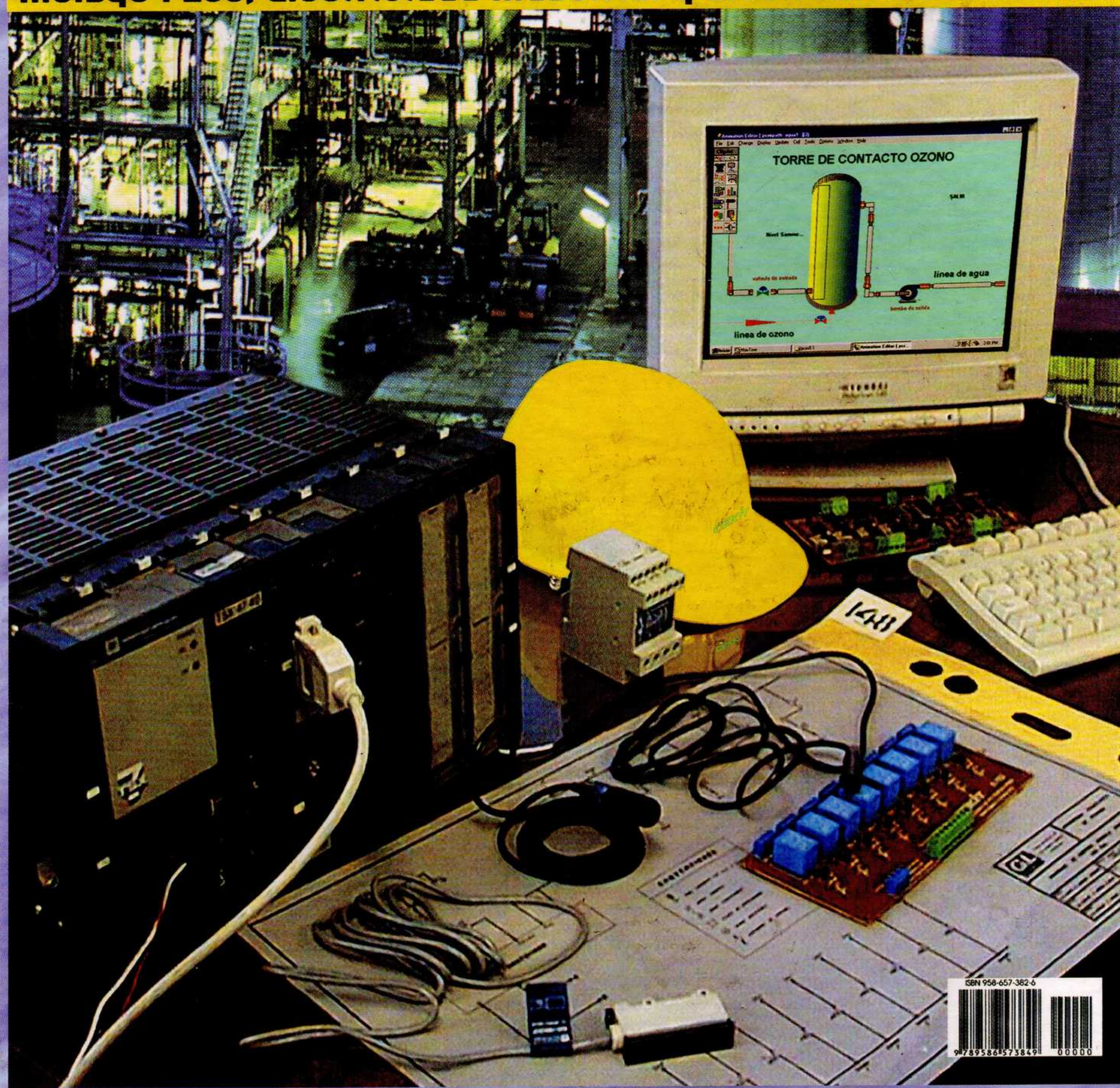
Electrónica Industrial y AUTOMATIZACION

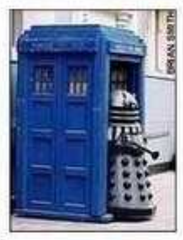
Incluye PLCs, Electricidad Industrial y Electrónica de Potencia



ISBN 958-657-382-6

EX LIBRIS Scan Digit

Juan B



The Doctor

http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/

http://el1900.blogspot.com.ar/

http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/

https://labibliotecadeldrmoreau.blogspot.com/

Capítulo 1

Introducción a la Electrónica Industrial

Cada día es más frecuente el uso de dispositivos, circuitos, equipos y métodos electrónicos en la industria. Este capítulo examina el marco de acción dentro del cual se desenvuelve la electrónica industrial, haciendo énfasis en sus aplicaciones en el campo del control de procesos. Se explica qué es la electrónica industrial, para qué sirve, dónde se utiliza, cuáles son las principales ventajas de controlar procesos industriales por métodos electrónicos, cómo se clásifican los sistemas de control industriales y cuáles son los elementos generales que componen los mismos.

El mundo de la electrónica industrial

La **electrónica industrial** trata fundamentalmente con el estudio, desarrollo y aplicación de componentes, circuitos, equipos y métodos electrónicos al control y automatización de procesos industriales, **figura 1.1**. Estas mismas técnicas, convenientemente asimiladas, son también aplicables al control y conversión de potencia eléctrica, y a otros campos distintos de la manufactura de productos, como la electromedicina, la agrónica, la robótica, la aeronáutica, la domótica, el tratamiento de aguas residuales, el transporte, etc., **figura 1.2**. Los sistemas de control y conversión de potencia, en particular, constituyen el núcleo de la **electrónica de potencia**, cuya teoría y aplicaciones generales se examinan en otra de las secciones de este curso.

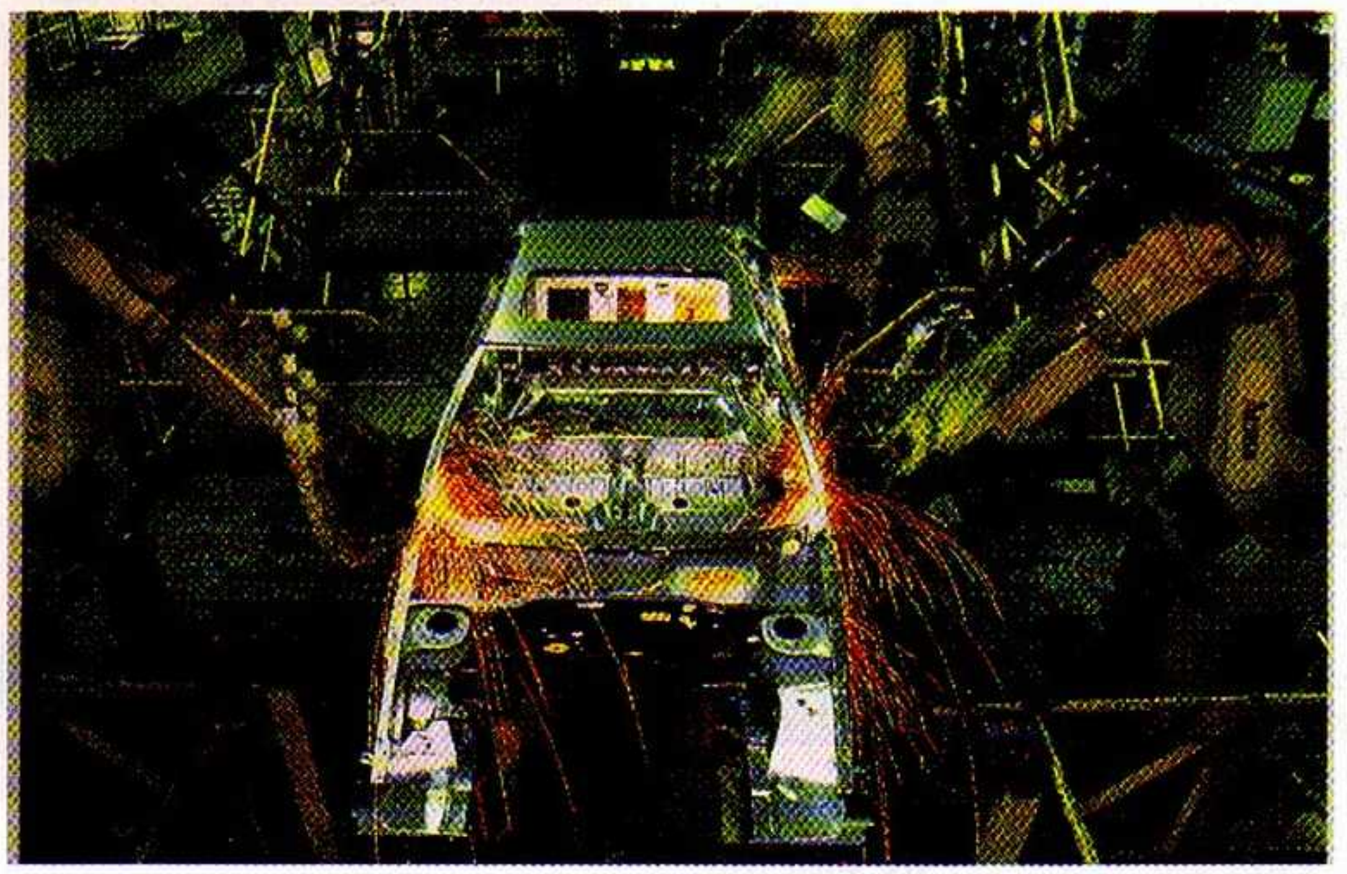


Figura 1.1 *La electrónica es clave en el control y la automatización de procesos industriales, como esta fase de soldadura en una línea de ensamble de automóviles*

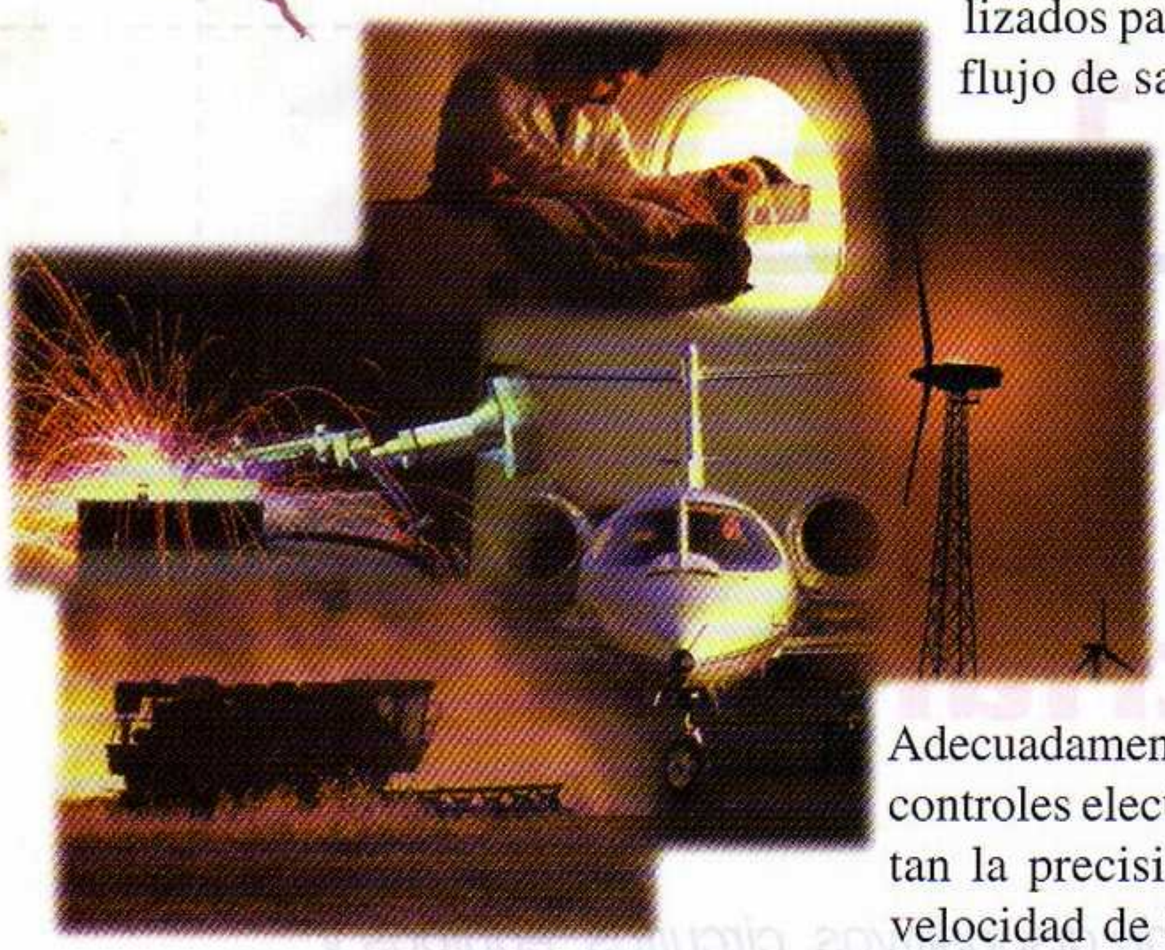


Figura 1.2 Ejemplos de procesos donde se aplican las técnicas de la electrónica industrial

La electrónica industrial moderna es una disciplina integral y multidisciplinaria. En la misma convergen la electrónica y la microelectrónica en sus múltiples facetas (análoga, digital, comunicaciones, etc.) con la computación, la electricidad, la mecánica, la neumática, la hidráulica, la física de los fluidos, la teoría del control, las matemáticas, y otras áreas del conocimiento humano.

También juegan un papel clave la experiencia y la habilidad humanas. Las técnicas de la electrónica industrial, a su vez, encuentran aplicación en otros campos. Por ejemplo, los mismos circuitos electrónicos utilizados para conseguir que el motor de una máquina gire a la velocidad apropiada pueden ser también utilizados para monitorear el flujo de sangre y detectar la presencia de coágulos en un riñón artificial.

La electrónica industrial ha alcanzado un lugar importante en la tecnología moderna. Adecuadamente aplicados, los controles electrónicos aumentan la precisión, exactitud y velocidad de los procesos de manufactura, reducen los costos de producción, simplifican la mano de obra y mejoran la calidad y cantidad de los productos terminados.

De hecho, la aplicación de la electrónica en la industria es un factor clave para el éxito de cualquier compañía manufacturera y, por tanto, de cualquier país. Actualmente, es inimaginable, e inconcebible, la existencia de una industria moderna sin la participación de la electrónica.

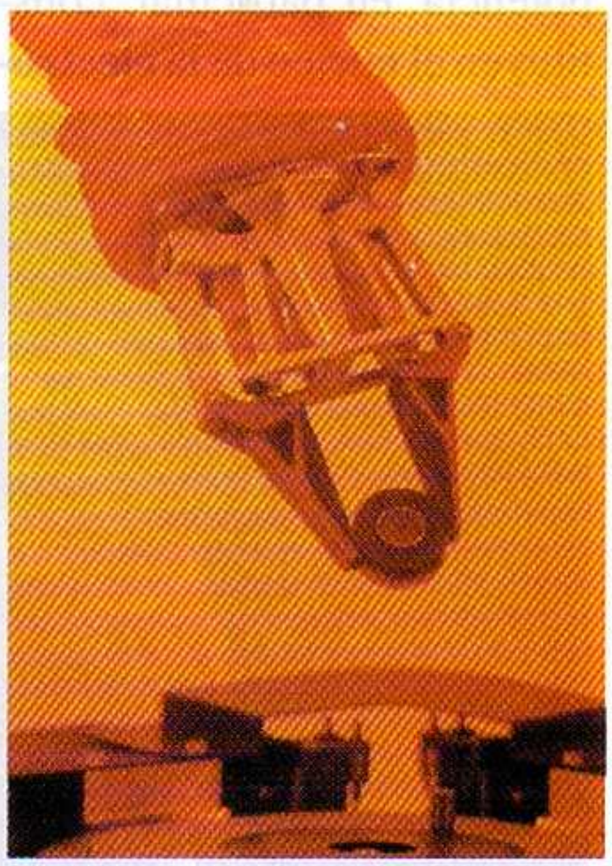


Figura 1.3 Los controles electrónicos permiten ejecutar acciones que están más allá de la capacidad humana.

Ventajas del control electrónico

La electrónica aplicada a la industria ha hecho posible automatizar muchos procesos, disponer de dispositivos de seguridad más efectivos y medir variables como la presión, la temperatura, la velocidad, etc., con mayor exactitud que cualquier otro método disponible.

Esto ha permitido la implementación de estrategias de control y de supervisión de operaciones industriales cada vez más precisas y confiables. Las siguientes son algunas de las formas a través de las cuales la producción industrial se beneficia del uso de controles automáticos:

- Se libera al operario de la función de realizar labores monótonas o peligrosas, y de intervenir físicamente en el proceso, minimizando la posibilidad de cometer errores y permitiéndole realizar una labor única de supervisión y vigilancia del mismo. Esta última puede hacerse desde uno o más centros de control situados en la propia planta o máquina, o desde centros de control remotos, inclusive vía satélite o a través de Internet.

- Se pueden ejecutar acciones que están más allá de la habilidad humana normal, por ejemplo medir y controlar con precisión grandes fuerzas y temperaturas, o manipular objetos muy pequeños, **figura 1.3.**

- Se reducen costos porque se pueden obtener productos, de cualquier grado de complejidad, muy uniformes, con variaciones mínimas de calidad y características entre ellos y ajustados a tolerancias muy estrictas, **figura 1.4**. Estas condiciones, que serían imposibles o difíciles de conseguir mediante técnicas de control manuales, traen como resultado ahorros significativos de energía, materiales, mano de obra, espacio y dinero.

- Se pueden realizar operaciones en condiciones extremas y riesgosas, por ejemplo ensamblar tarjetas electrónicas a gran velocidad o manipular remotamente objetos dentro de un horno o en una atmósfera de gases tóxicos, **figura 1.5**. Así se mejora la seguridad del operario, se reducen los riesgos de accidentes de trabajo y se consigue una mayor productividad.

Los beneficios anteriores, y otros similares, son posibles gracias al hecho de que los sistemas de control automático se diseñan para conservar uno o más parámetros de un proceso dado dentro de límites o tolerancias específicas con un mínimo de intervención humana.

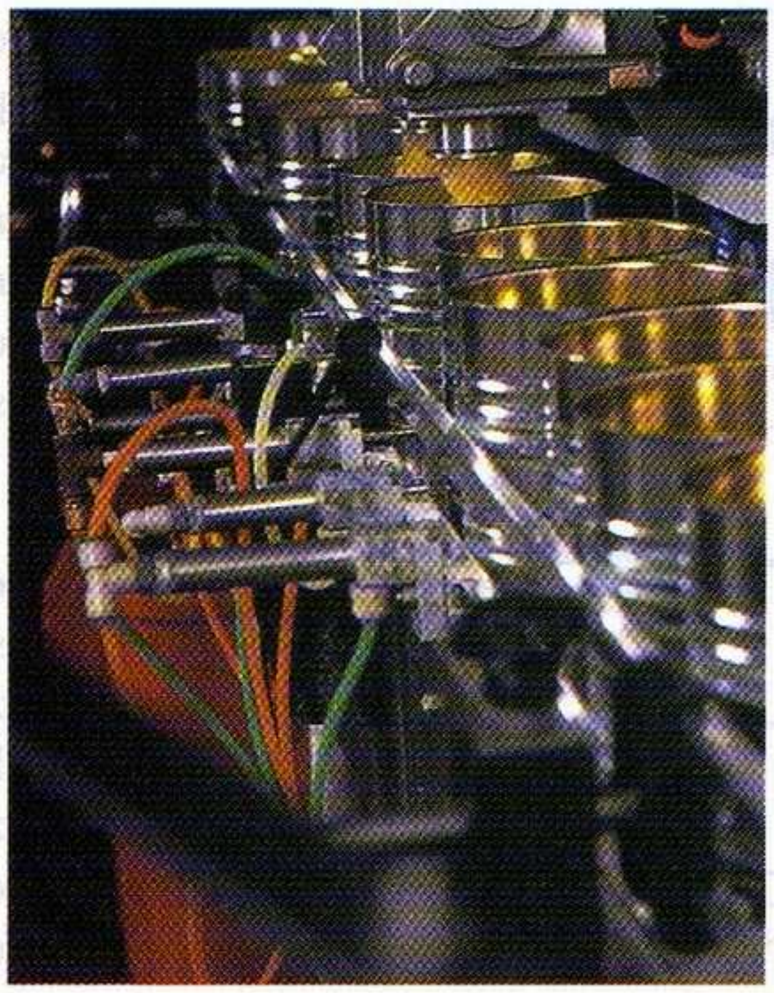


Figura 1.4 Los controles electrónicos permiten obtener masivamente productos de características y calidad muy uniformes, a grandes velocidades y con un mínimo de pérdidas.

Tipos de sistemas de control industriales

La electrónica industrial, como se mencionó al comienzo, trata fundamentalmente con el análisis y desarrollo de **sistemas de control**. Un **sistema** es simplemente una combinación de elementos relacionados entre sí, necesarios para realizar una o varias funciones que ninguno podría hacer por sí mismo. Este concepto se aplica no solamente a sistemas físicos, como los encontrados en la industria, sino también a fenómenos abstractos y dinámicos, como los sistemas económicos, biológicos, químicos, y similares.

En el caso de un **sistema de control**, la función del mismo es mantener cualquier variable de interés, digamos la velocidad de una máquina o la tasa de inflación de un país, dentro de unos límites determinados, o alterarla de una cierta manera deseada. Los sistemas de control pueden ser de **lazo cerrado** o de **lazo abierto**, dependiendo de si la variable controlada tiene o no efecto sobre la variable manipulada, es decir la que utiliza el controlador para modificarla.

En un sistema de control de velocidad de un motor, por ejemplo, la modificación de la variable controlada (velocidad) se realiza a través de

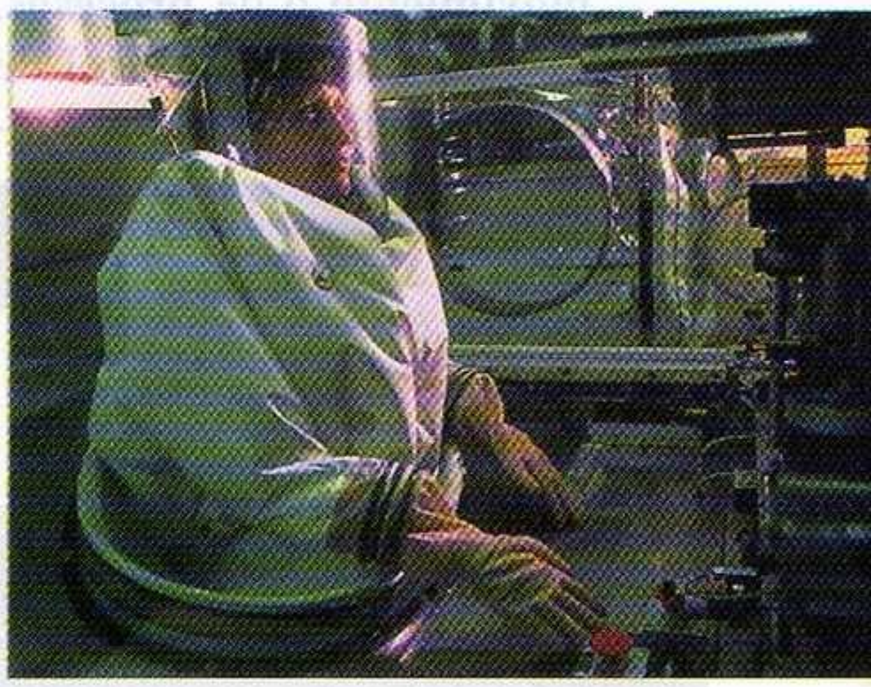
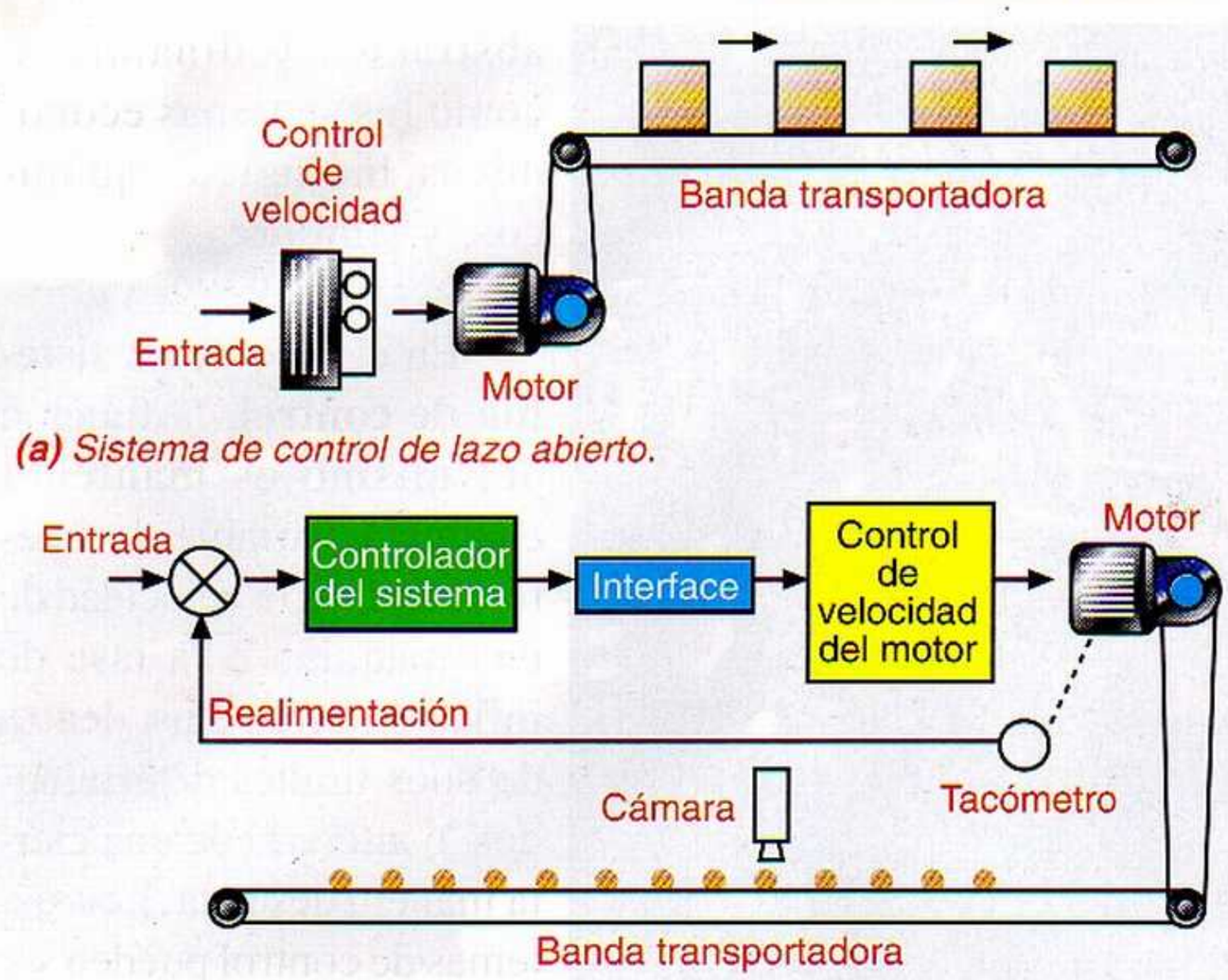


Figura 1.5 Los controles electrónicos permiten accionar productos en condiciones riesgosas o extremas, protegiendo la integridad de los operarios.



(a) Sistema de control de lazo abierto.

(b) Sistema de control de lazo cerrado.

***Figura 1.6** Ejemplos de sistemas de control de velocidad de lazo abierto y de lazo cerrado de una banda transportadora.*

una señal eléctrica (variable manipulada). Estos conceptos serán ampliados en el próximo capítulo.

Los sistemas de control industriales, tanto de lazo abierto como de lazo cerrado, **figura 1.6**, están enfocados principalmente al control de **movimiento** o de **procesos**. Los **sistemas de control de movimiento**, conocidos también como **servomecanismos** o **servos**, se utilizan para controlar el movimiento o posición física de un objeto. Los controles de banda transportadora de la **figura 1.6** son de este tipo.

Otro ejemplo de servo es un brazo de robot industrial encargado de soldar partes en una línea de ensamblaje de automóviles. Un sistema de este tipo debe controlar la posición, velocidad y aceleración del objeto, medir la variable controlada y responder rápidamente a los comandos de entrada, en fracciones de segundo.

Los **sistemas de control de procesos**, por su parte, que son los más comunes, se utilizan para controlar procesos. Los procesos están caracterizados por una serie de pasos o cambios graduales que se suceden uno a continuación del otro de manera relativamente fija y que conducen al objetivo buscado, **figura 1.7**.

Los procesos industriales son muy variados y abarcan muchos tipos de productos, incluyendo derivados del petróleo, textiles, hilos, alimentos, licores, aceros, papel, material impreso, etc. En todos estos casos, la función de los sistemas de control es permitir el mantenimiento y la regulación de la variable controlada (presión, caudal, temperatura, pH, etc.) de una manera más eficiente, rápida y confiable de como lo haría un operador humano.

Los sistemas de control de procesos, a su vez, pueden ser, continuos o discretos. En un **proceso discreto**, sobre el producto que está siendo fabricado se ejecuta una secuencia de operaciones precisas. Un ejemplo es una máquina productora de galletas, **figura 1.8**.

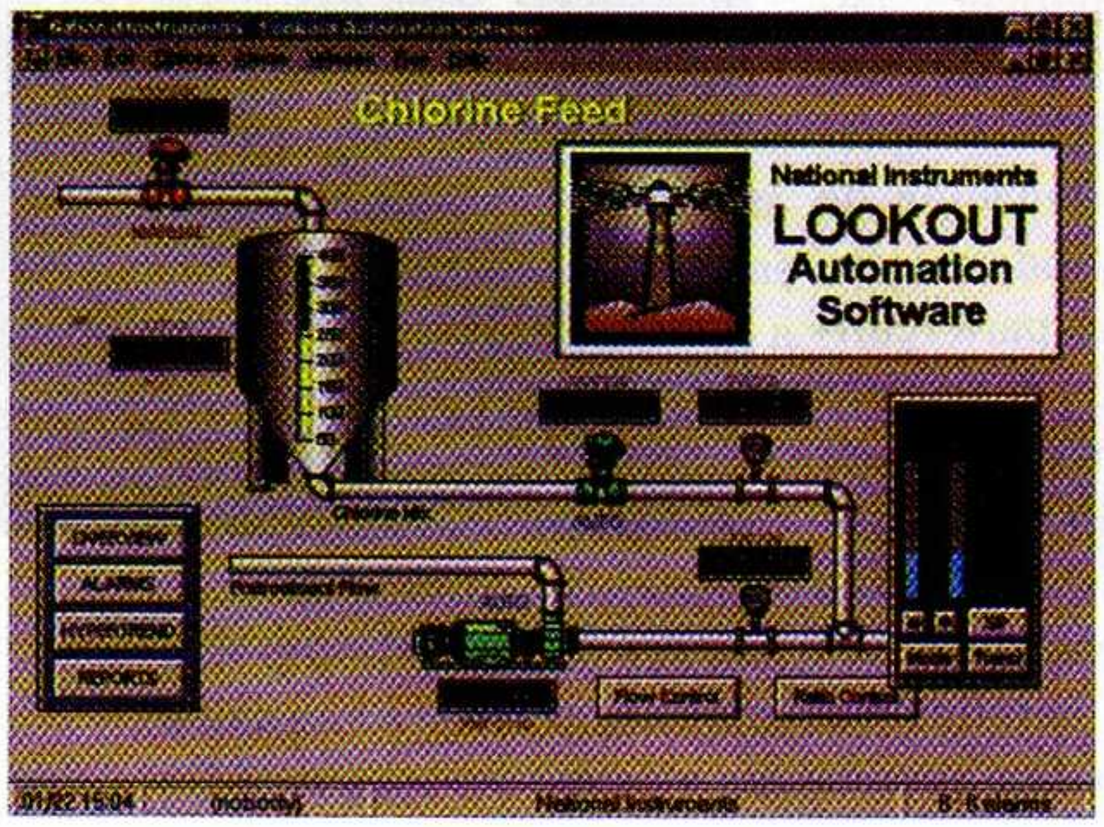


***Figura 1.7** Ejemplo de un proceso industrial controlado por computador*

En este caso, primero se calienta el horno a la temperatura deseada. Luego, se dispersan y mezclan los ingredientes requeridos, y se agrega la vainilla. Una vez la masa adquiere la consistencia apropiada, se expulsa dosificada mediante aire a presión. Finalmente, se lleva a través de una banda transportadora al horno de cocción y luego a la máquina de empacado. Este tipo de procesos son típicos de productos hechos de mezclas de ingredientes, incluyendo alimentos, petróleos, jabones, medicinas, etc.

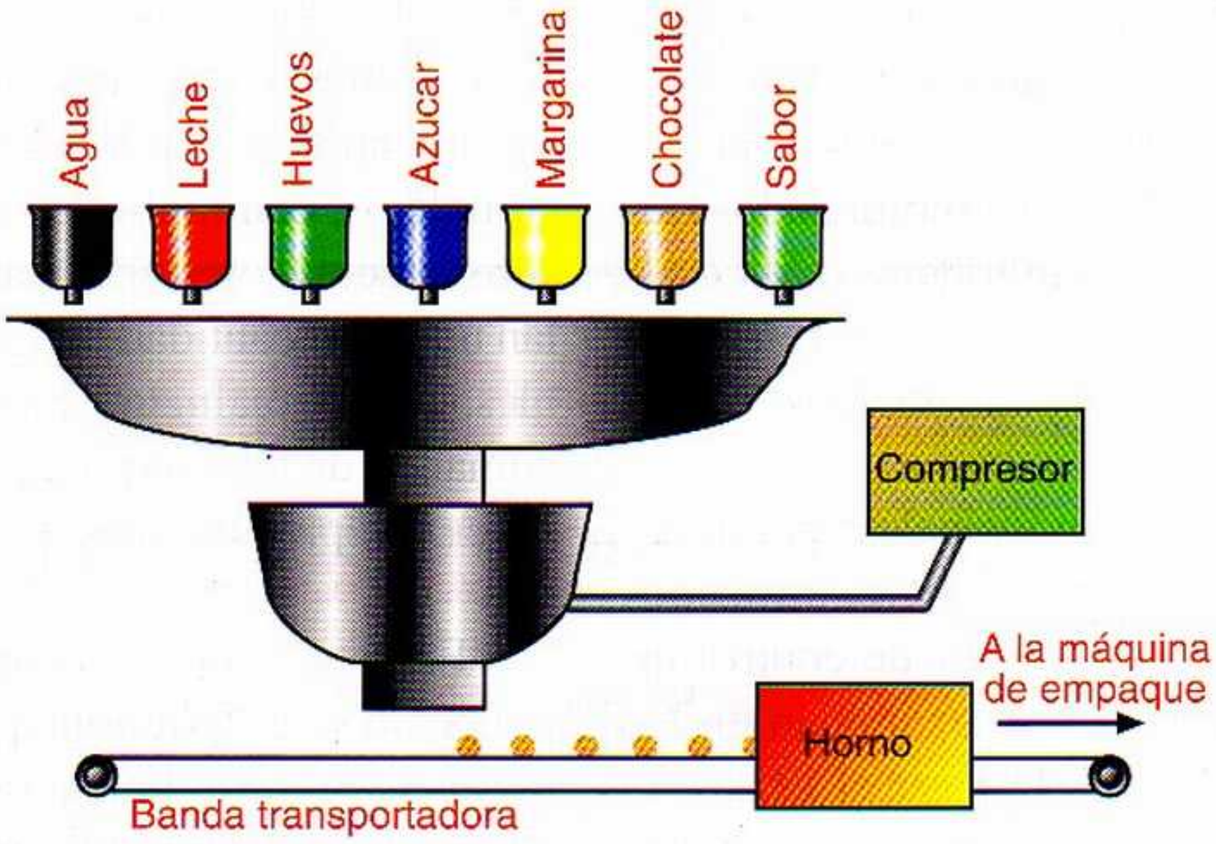


Figura 1.8 Ejemplo de proceso discontinuo. Máquina productora de galletas.

En un **proceso continuo**, por su parte, permanentemente están entrando y saliendo materias primas de cada etapa, y realizándose una o más operaciones a medida que pasa el producto. Un ejemplo es una red de impresión offset, como la utilizada para producir el libro o fascículo que está leyendo. En este caso, el papel en blanco se alimenta desde un rollo a las cabezas de impresión, donde se le aplican selectivamente las tintas correspondientes a los textos e imágenes.

Una vez seca la tinta, la tira impresa pasa a través de plegadoras y otras máquinas que confeccionan los productos terminados. A través del proceso se monitorean y regulan el balance de agua y tinta, las presiones de los cilindros y rodillos, la velocidad del papel, y otras variables. El papel, los alambres, los textiles, las bolsas plásticas, y una infinidad de productos que utilizamos en nuestra vida diaria son el resultado de procesos continuos.

Elementos generales de los sistemas de control

La mayoría de los sistemas de control industriales, tanto de procesos como de movimiento, constan de elementos funcionales similares que se utilizan para regular el flujo de materiales a través de los mismos y sincronizar su secuencia de eventos en el tiempo. Estos elementos generales son el controlador del sistema, los actuadores, los controles del actuador, los sensores y las interfaces de señal, **figura 1.9**.

El **controlador del sistema** proporciona la inteligencia para el sistema de control. Puede ser un controlador lógico programable (PLC), un microprocesador, un microcontrolador, una computadora análoga o digital, un juego de reles y/o contactores, etc. Su función primaria es actuar como el administrador de tiempos y de tráfico de señales del sistema, de modo que todas las funciones ocurran en el instante y en el orden correctos.

En otras palabras, el controlador es el cerebro del sistema de control. La teoría general de los controladores análogos y digitales se examina en los capítulos **19** y **20** de esta sección del curso. Los aspectos específicos relacionados con los controladores basados en PLCs, microcontroladores y computadoras se examinan en la sección de **Automatización**. Los controles y automatismos basados en relés y contactores se tratan en la sección de **Electricidad Industrial**.

Los **actuadores** o transductores de salida se comportan como los músculos del sistema de control, convirtiendo

la potencia eléctrica aplicada a ellos en alguna forma de acción fisica. Ejemplos de actuadores son los motores, los frenos, los embragues (*clutches*), las solenoides, los relés, las válvulas y las bombas.

Los principales tipos de actuadores eléctricos utilizados en los sistemas de control industriales se examinan en los capítulos **15** hasta el **17** de esta sección del curso. Los motores, en particular, se examinan en detalle en la sección de **Electricidad Industrial**. Los actuadores hidráulicos y neumáticos se tratan en la sección de **Automatización**.

Los **controles de los actuadores**, como su nombre lo indica, controlan individualmente la velocidad de motores, la apertura o el cierre de válvulas, la energización o desenergización de solenoides, etc. En muchos sistemas, relativamente simples, los mismos operan como controladores del sistema, mientras que en otros, más complejos, con múltiples sensores y actuadores que controlan una gran cantidad de variables, están usualmente bajo el comando de un controlador de sistema separado.

En esta y otras secciones del curso se proporcionan numerosos circuitos prácticos de controles de actuadores en los espacios pertinentes. Los controladores o *drives* de motores AC y DC, en particular, se examinan en detalle en la sección de **Electrónica de Potencia**.

Los **sensores** o transductores de entrada actúan como los sentidos de un sistema de control, convirtiendo los parámetros a ser medidos, controlados o supervisados, en señales eléctricas equivalentes que pueden ser interpretadas por el controlador. Existen sensores para cada necesidad industrial, incluyendo la medición de velocidad, posición, peso, volumen, tensión, temperatura, presión, humedad, etc.

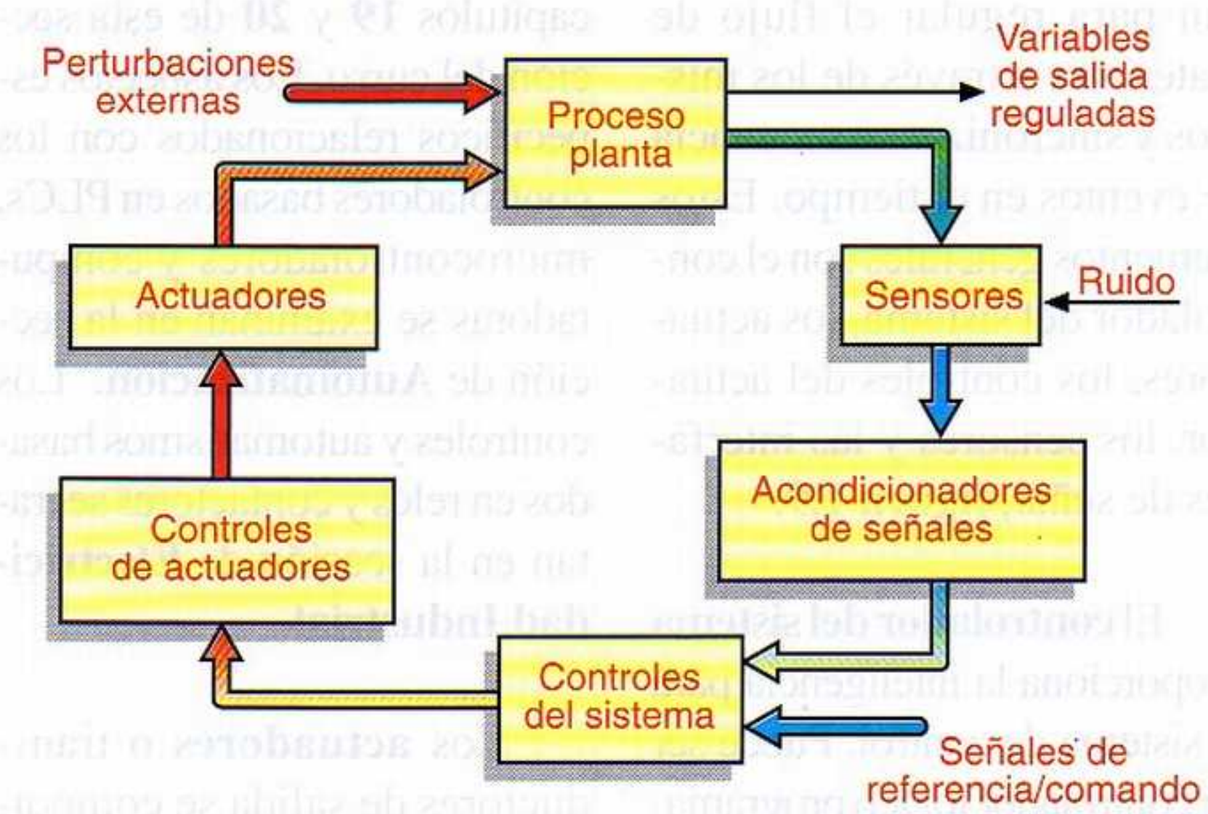


Figura 1.9 Elementos generales de un sistema de control industrial automático

La salida de un sensor causa que el controlador dispare alguna forma de actuador para comenzar, terminar, interrumpir o regular un proceso. Los principales tipos de sensores utilizados en los sistemas de control industriales se examinan en los capítulos **3** hasta el **13** de esta sección del curso.

Los sensores, actuadores y controladores operan todos sobre una gran variedad de niveles y tipos de señales, a menudo incompatibles. Por tanto, deben emplearse **interfaces** o circuitos de acondicionamiento adecuados para convertir señales de un tipo a otro, reforzar niveles de señal de un dispositivo a otro, llevar o transmitir señales de un sitio a otro, aislar etapas entre sí, eliminar ruido, etc.

Por ejemplo, la salida de un sensor análogo debe ser previamente digitalizada para procesarla mediante una computadora digital, y la salida digital de esta última debe ser convertida a una señal análoga antes de ser aplicada al control de temperatura de un horno. Los circuitos de interface y acondicionamiento de señales se examinan en el **capítulo 14** de esta sección del curso. Ω

Capítulo 2

Conceptos básicos de Sistemas de Control

Los sistemas de control automáticos desempeñan un papel fundamental en los procesos industriales modernos y han sido, desde la primera revolución industrial, un factor decisivo en los grandes avances científicos y tecnológicos de la humanidad. Este capítulo examina a grandes rasgos las principales características de los sistemas de control automáticos, incluyendo los elementos y términos utilizados para su caracterización, y los criterios que debe tenerse en cuenta para su análisis, diseño e implementación

Generalidades

Un **sistema de control** puede ser definido como el medio a través del cual una cantidad o variable cualquiera de interés en una máquina, mecanismo o proceso, es mantenido o alterado de acuerdo con un patrón de comportamiento deseado. Como ejemplo, considérese el sistema de impulsión de un automóvil, **figura 2.1**. En este caso, la velocidad del automóvil depende de la posición del acelerador y puede ser mantenida o alterada controlando la presión sobre el pedal. El acelerador, el carburador y el motor del vehículo constituyen un sistema de control básico, con una variable de entrada (la fuerza que ejerce el conductor sobre el pedal del acelerador) y una variable de salida (la velocidad del automóvil).

En todo sistema de control, el foco central de atención es la **planta**, es decir la máquina, mecanismo o proceso a ser controlado. En nuestro ejemplo, la planta es

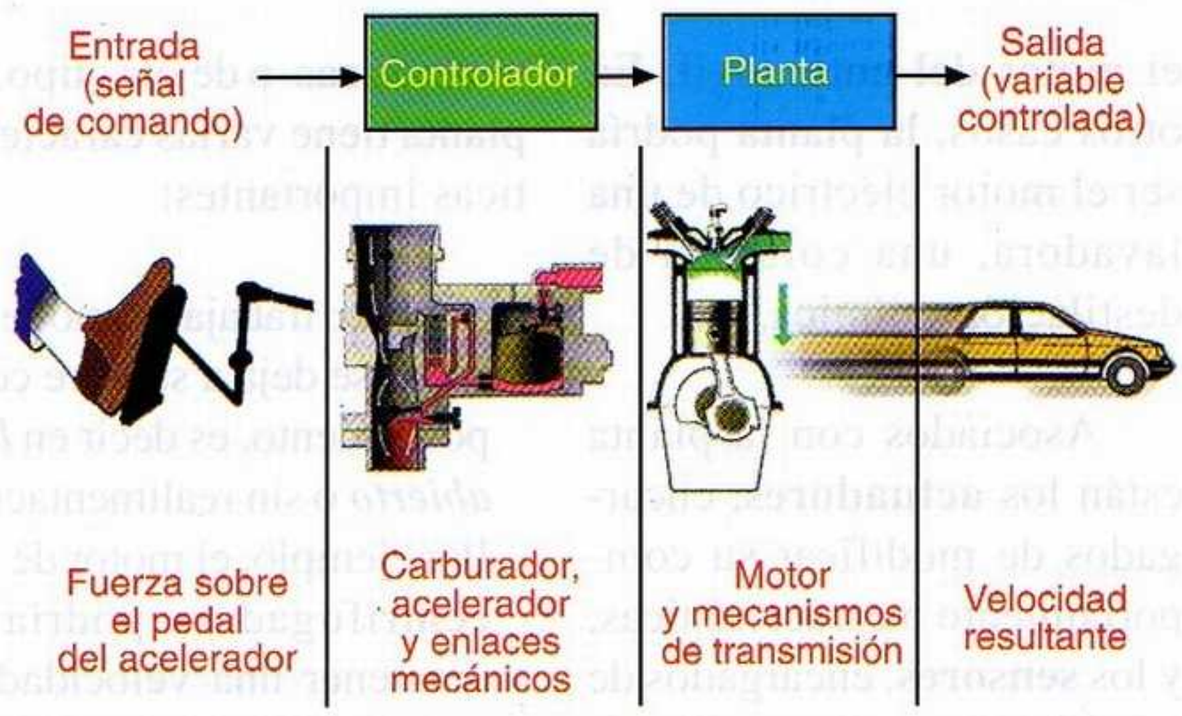


Figura 2.1 El sistema de impulsión de un vehículo es un ejemplo de sistema de control básico

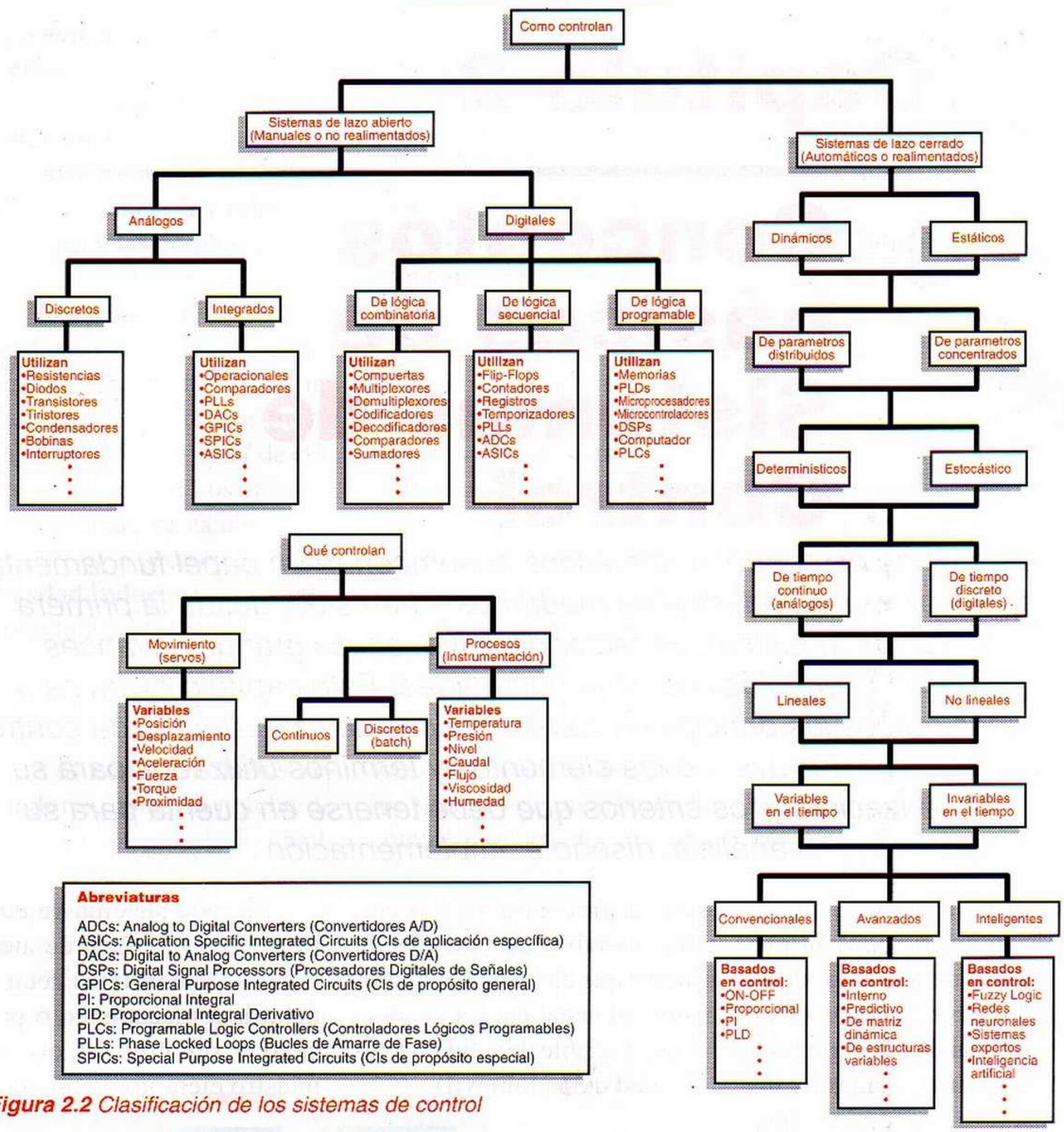


Figura 2.2 Clasificación de los sistemas de control

el motor del automóvil. En otros casos, la planta podría ser el motor eléctrico de una lavadora, una columna de destilación química, etc.

Asociados con la planta están los **actuadores**, encargados de modificar su comportamiento o características, y los **sensores**, encargados de describir su comportamiento mediante señales eléctricas, neumáticas o de otro tipo. La planta tiene varias características importantes:

- Puede no trabajar como se desea si se deja a su libre comportamiento, es decir en ***lazo abierto*** o sin realimentación. Por ejemplo, el motor de una centrifugadora podría no mantener una velocidad de giro uniforme o podrían no conservarse las condiciones de presión y temperatura requeridas para el óptimo funcionamiento de una caldera.
- Puede estar sometida a perturbaciones externas que no están bajo el control del usuario; por ejemplo, torques de carga sobre un motor, tormentas de viento sobre un avión, baches en la carretera sobre un automóvil, etc.

- Puede ser monitoreada defectuosamente debido a la presencia de señales de ruido que afectan las mediciones de los sensores. Esto podría ocasionar, por ejemplo, lecturas incorrectas de concentración de impurezas en una planta de tratamiento de aguas o fugas de líquido en un tanque de almacenamiento de combustibles.

Para evitar que todo esto suceda, y garantizar que una planta se comporte de la manera deseada, es necesario incorporarla a un sistema de control automático. Este último cumple básicamente la función de permitir que la variable o variables de salida reguladas (posición, velocidad, temperatura, presión, etc.) sigan una señal de referencia, por ejemplo un punto de trabajo (*set point*) de un horno eléctrico, digamos 400º C.

Tipos de sistemas de control

Como vimos en el **Capítulo 1**, los sistemas de control pueden ser clasificados básicamente de acuerdo a dos criterios: **qué** controlan y **cómo** controlan. Desde el primer punto de vista (el qué), existen sistemas de control de movimiento o servos y sistemas de control de procesos. Desde el segundo punto de vista (el cómo), se habla de sistemas de lazo abierto o manuales, y sistemas de lazo cerrado o automáticos.

En cada una de estas clasificaciones, existen sus propias subcategorías, **figura 2.2**. En esta sección nos referiremos exclusivamente a los sistemas de lazo abierto y de lazo cerrado, particularmente a estos últimos, que son los más utilizados y eficientes.

Un sistema de control es de **lazo abierto** cuando la variable de salida no afecta la acción de control. En otras palabras, no se mide la salida (variable controlada) ni se realimenta para compararla con la entrada (señal de referencia). Por tanto, no utiliza sensores y a cada entrada de referencia le corresponde una condición operativa fija. Como resultado, la precisión del sistema depende de la calibración. Ante la presencia de perturbaciones, el mismo no realiza eficientemente la tarea deseada. El sistema de la **figura 2.1** es de este tipo.

Los sistemas de lazo abierto se denominan también **no realimentados** o **manuales**. Se utilizan en aplicaciones relativamente sencillas, donde no se requiere mucha exactitud; no hay perturbaciones internas ni externas, o existe una relación conocida entre la entrada y la salida.

Otro ejemplo de sistema de lazo abierto es el control de velocidad de algunos taladros. En este caso, el operario fija la velocidad deseda en un selector, mientras un circuito electrónico se encarga de regular el voltaje aplicado al motor. Puesto que la velocidad depende fuertemente de la carga, el operario debe estar atento a cualquier variación de la velocidad y corregirla con el selector sin la ayuda del sistema.

Un circuito práctico de control eléctrónico de este tipo para un taladro pequeño, hasta

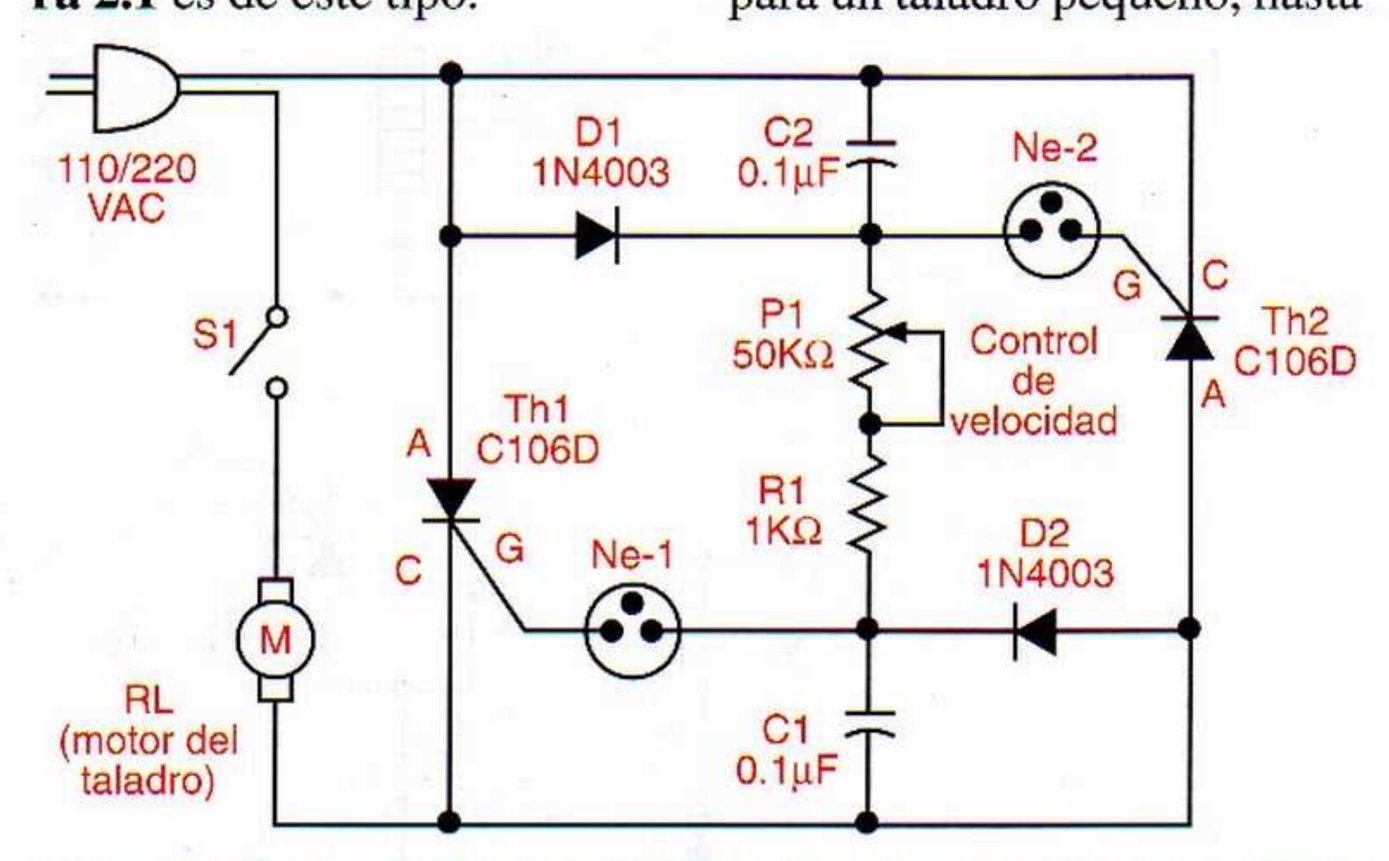


*Figura 2.3 Circuito práctico de un controlador de velocidad de lazo abierto para un taladro hasta de 350W (kit **CEKIT K-019**). Las lámparas de neón (Ne-1 y Ne-2) pueden ser sustituidas por diacs 1N5758 (20V) o similares. El circuito también puede ser utilizado como dimmer o regulador de luz de lámparas incandescentes hasta de 250W.*

de 350W, se muestra en la **figura 2.3**. El circuito, disponible como kit para armar bajo la referencia **K-019** de **CEKIT**, se alimenta de la red de 120/220VAC y no utiliza ningún tipo de sensor. La velocidad deseada se fija mediante P1. S1 actúa como interruptor general.

En este caso, durante los semiciclos positivos, C1 se carga a través de D1 y P1+R1 hasta que alcanza el valor de disparo de Ne-1, digamos 60V. Cuando esto sucede, Ne-1 conduce, se dispara Th1, C1 se descarga y circula corriente a través de RL. Durante los semiciclos negativos, C2 se carga a través de D2 y P1+R1 hasta que alcanza el valor de disparo de Ne-2. Nuevamente, Ne-2 conduce, se dispara Th2, se descarga C2 y se energiza RL. El proceso se repite.

Note que Th1 o Th2 sólo conducen durante una porción de cada semiciclo, dependiendo de la velocidad de carga de C1 o C2 y el punto de disparo de Ne-1 o Ne-2. Por tanto, RL sólo recibe una parte del voltaje total disponible en cada ciclo. Este modo de regulación de potencia se denomina comúnmente **control por fase**.

Un sistema es de **lazo cerrado** cuando utiliza elementos adicionales para medir o sensar la variable de salida, realimentarla procesada a la entrada, compararla con la señal de referencia y utilizar la diferencia (señal de error) para obtener la respuesta de salida deseada. Por tanto, mantiene una relación preestablecida entre la salida y la entrada, y es capaz de autocorregirse en caso de una perturbación externa.

La señal de realimentación o *feedback* es producida generalmente a partir de un sensor que mide la variable de salida y la convierte en una señal adecuada para ser procesada por el controlador del sistema y comparada con la señal de referencia. El sistema de la **figura 1.9** es de este tipo. Los sistemas de lazo cerrado se denominan también **realimentados** o **automáticos** y son los más utilizados en control industrial.

Otro ejemplo de sistema de lazo cerrado es un sistema de control de temperatura de un horno eléctrico. En este caso, la temperatura del proceso se monitorea y mide mediante un sensor apropiado (termocupla, RTD, termistor, etc.), se convierte a una señal eléctrica equivalente, y se compara con una señal de referencia que representa la temperatura deseada.

Si la señal de realimentación es mayor o menor que la señal de referencia, porque la temperatura real es mayor o menor que la deseada, el controlador, a través de una interface apropiada, envía una señal al calefactor para corregir la discrepancia y conseguir que el horno trabaje a la tempera-

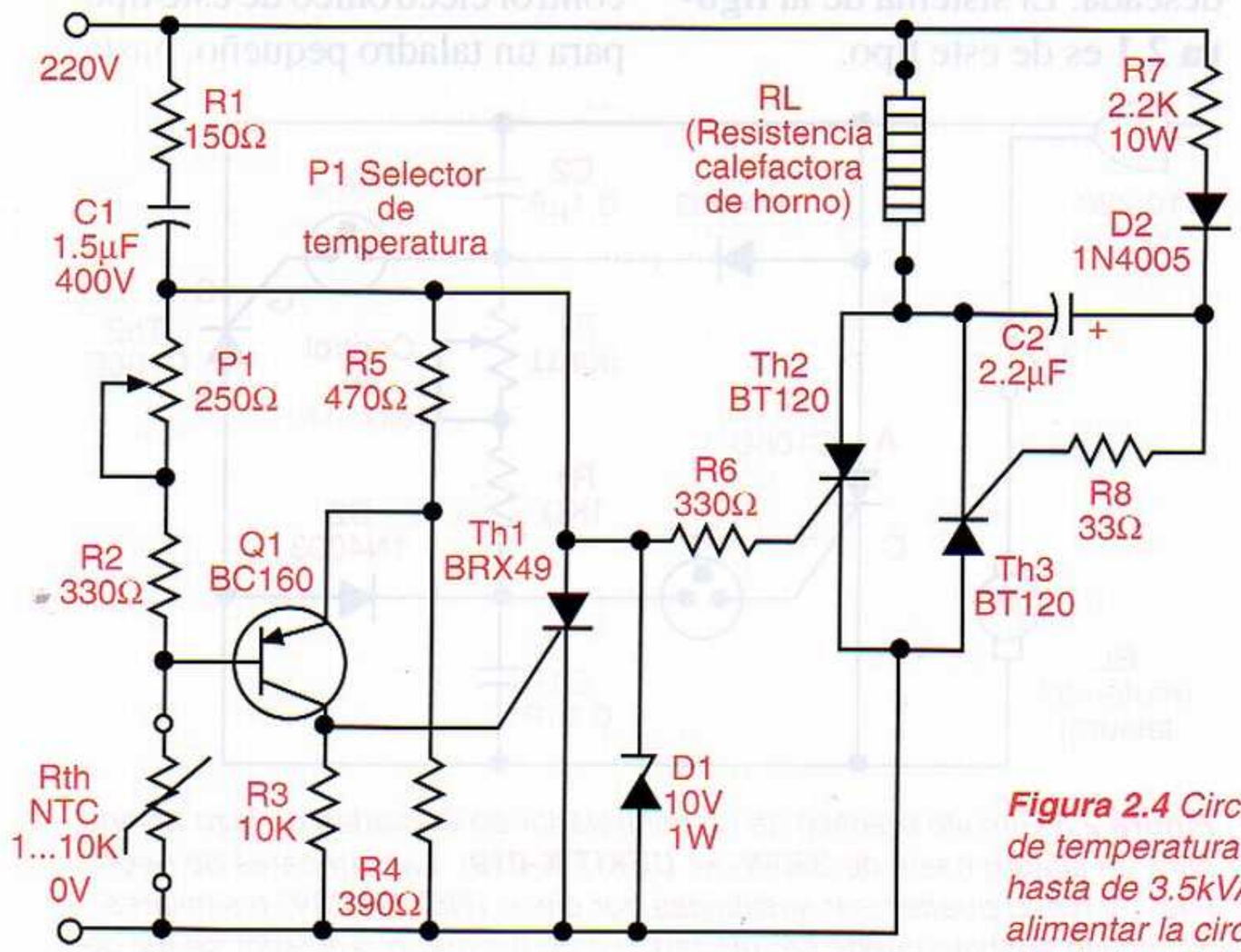


Figura 2.4 Circuito práctico de un controlador de temperatura de lazo cerrado para un horno hasta de 3.5kVA. La red R1C1 permite alimentar la circuitería electrónica directamente desde la red AC de 120V o 220V

tura requerida. Un circuito práctico de control eléctrónico de temperatura de este tipo para hornos hasta de 3.5kVA se muestra en la **figura 2.4**.

El sistema mostrado se alimenta directamente de una red de 120/220VAC y utiliza un termistor (NTC) como sensor. La temperatura deseada se fija mediante P1. Si esta última es menor que la temperatura ambiente del horno, la resistencia del termistor (Rth) disminuye, Q1 conduce, se dispara Th1, los tiristores Th2 y Th3 se bloquean, no fluye corriente a través del elemento calefactor (RL) y la temperatura del horno desciende.

Cuando esta última cae por debajo del valor deseado, Q1 y Th1 se bloquean, conduce Th2 o Th3, se energiza RL y aumente la temperatura del horno. El proceso se repite.

Note que Th2 sólo conduce durante los semiciclos positivos y Th3 sólo durante los negativos. Este modo de regulación de potencia se denomina comúnmente **control proporcional** o por **ciclos enteros**.

La realimentación puede ser **positiva** o **negativa**, dependiendo de si la señal de realimentación tiene o no la misma polaridad de la señal de comando, es decir si las dos señales se suman o restan para producir la señal de error.

La **realimentación negativa**, llamada también **feedback degenerativo**, es la más utilizada en sistemas de control industriales debido a su capacidad de autocorregirse continuamente, su habilidad para seguir la señal de referencia de una manera confiable, su capacidad de reaccionar ante cambios o perturbaciones súbitas, y otros efectos benéficos importantes. El circuito de la **figura 2.4**, por ejemplo, utiliza realimentación de este tipo.

La **realimentación positiva**, por su parte, denominada también **feedback regenerativo**, es rara vez utilizada en control industrial debido a que puede causar inestabilidad, es decir la pérdida del control de la variable de salida por parte de la señal de entrada.

Una variante de los sistemas realimentados o de lazo cerrado, son los **sistemas de control feedforward** o **anticipativos**, los cuales, como su nombre lo indica, previenen cualquier error antes de que ocurra. En la **figura 2.5** se muestra un ejemplo de un sistema de este tipo, correspondiente a un control de nivel de líquido para un tanque de reserva. En este caso, hay dos conductos o puertos (P1 y P2)

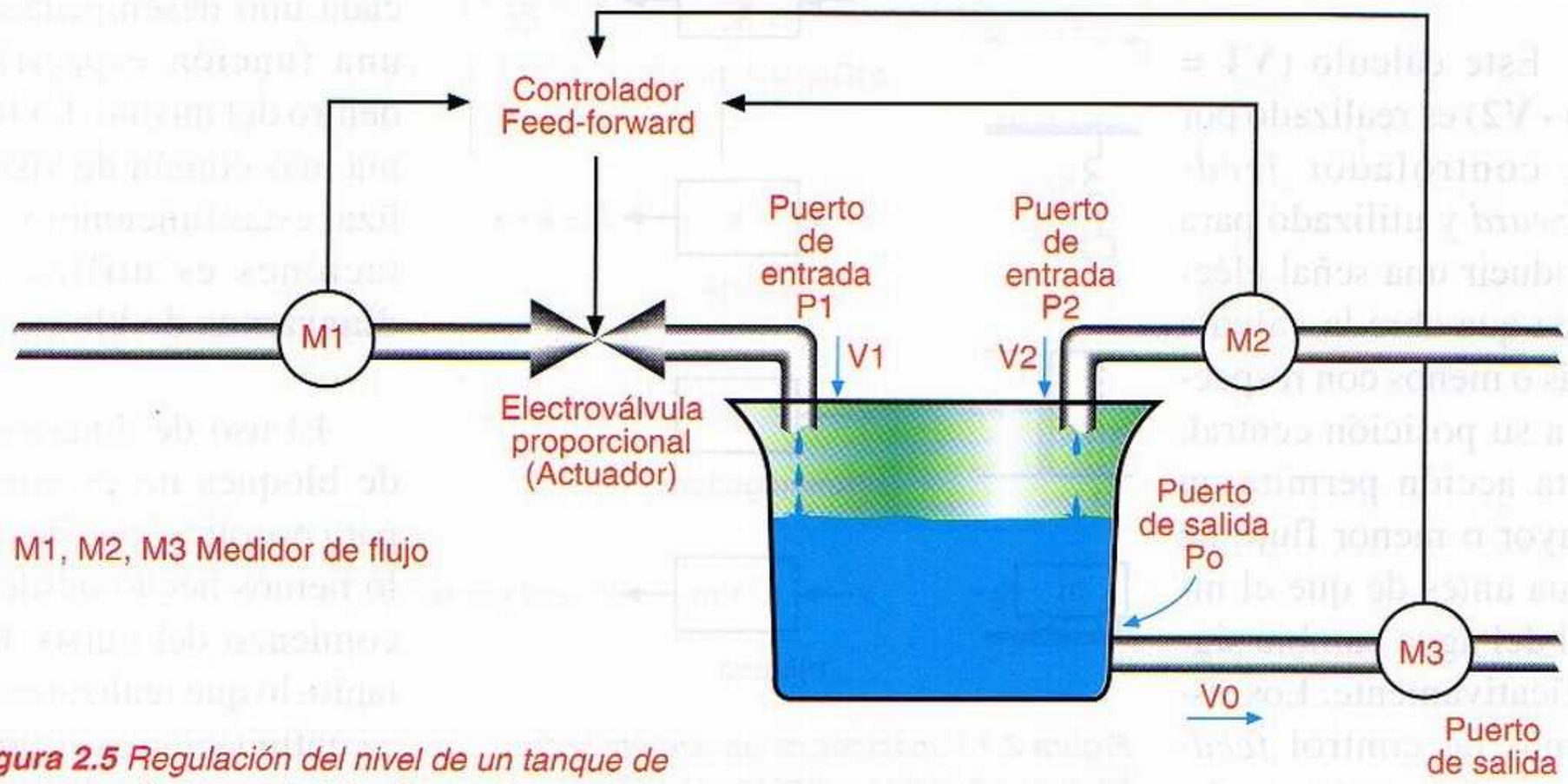


Figura 2.5 Regulación del nivel de un tanque de reserva mediante control feedforward.

que proporcionan el agua de entrada al tanque y uno de salida (Po). La velocidad o rata a la cual fluye el líquido a través de los tres conductos (V1, V2 y Vo) se monitorea mediante medidores de flujo. Adicionalmente, el conducto P1 incluye una válvula de paso proporcional.

Para mantener un nivel constante, el agua debe fluir dentro el tanque a la misma rata a la cual sale, esto es **Vo=V1+V2**. Sin embargo, si ocurre una perturbación que altere a P2 o a Po, esta condición de equilibrio se alterará y el nivel del líquido se desviará del valor deseado. Para evitar que esto suceda, debe controlarse la velocidad de entrada del líquido en P1 (V1) restando continuamente la velocidad de entrada del mismo en P2 (V2) de su velocidad de salida en Po (Vo).

Este cálculo (**V1 = Vo - V2**) es realizado por un controlador *feed-forward* y utilizado para producir una señal eléctrica que abre la válvula más o menos con respecto a su posición central. Esta acción permite un mayor o menor flujo de agua antes de que el nivel del agua cambie significativamente. Los sistemas de control *feed-forward*, sin embargo, tienen algunas limitaciones que los hacen inherentemente inexactos. Por ejemplo, pueden existir perturbaciones no medibles difíciles de detectar, digamos una válvula de flujo desgastada, un sensor defectuoso o cálculos matemáticos inexactos. En nuestro caso, estas perturbaciones afectan la operación del sistema, causando que el agua en el tanque alcance eventualmente un nivel inaceptable.

Figura 2.6 Representación de un bloque funcional en un diagrama de bloques

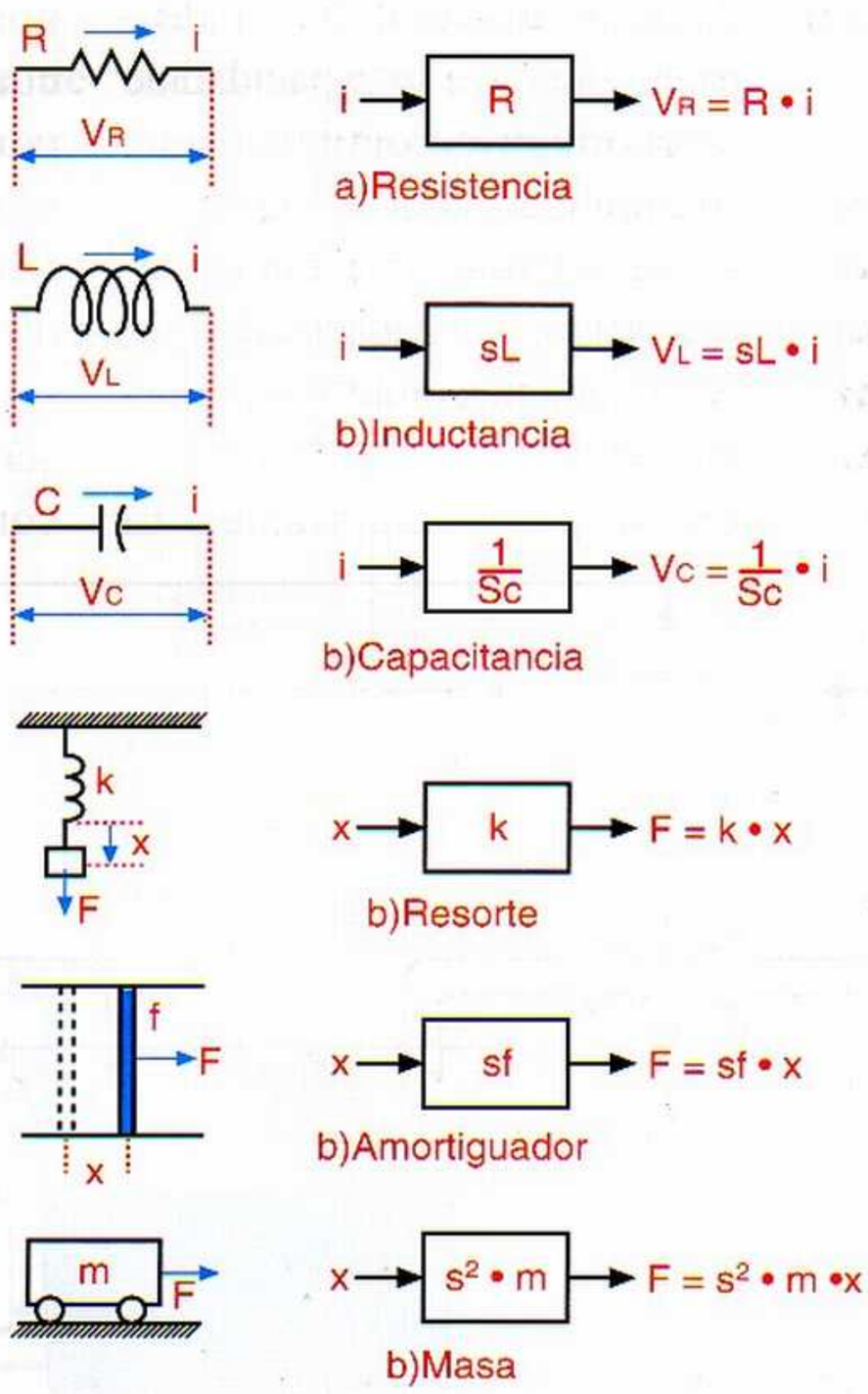


Figura 2.7 Funciones de transferencia de bloques eléctricos y mecánicos básicos

Además, muchos procesos tienen tiempos de respuesta muy largos. Por estas razones, el control *feed-forward* es rara vez utilizado como tal en sistemas de control industriales. En su lugar, se emplea combinado con control realimentado convencional. Así se consigue una mejor compensación de las perturbaciones grandes y los tiempos de respuesta prolongados.

Representación y terminología de los sistemas de control

Un sistema de control automático, como se explicó en el **Capítulo 1**, posee varios elementos característicos como el controlador del sistema, los actuadores, los controles de los actuadores, los sensores y las interfaces de señal, relacionados entre sí pero cada uno desempeñando una función específica dentro del mismo. La forma más común de visualizar estas funciones y relaciones es utilizando **diagramas de bloques**.

El uso de diagramas de bloques no es nuevo para nosotros, puesto que lo hemos hecho desde el comienzo del curso. Por tanto, lo que realizaremos a continuación es simplemente una formalización de su teoría.

Un **diagrama de bloques** es simplemente una representación gráfica de las funciones que lleva a cabo cada componente de un sistema de control y el flujo de señales entre ellos. Como tal, un diagrama de bloques muestra las relaciones existentes entre los diversos componentes del sistema. Normalmente, en cada bloque se incluye una gráfica o ecuación que representa su **función de transferencia**, es decir la forma como ese bloque particular relaciona las señales de entrada y de salida del mismo para realizar su trabajo, **figura 2.6**.

La función de transferencia se representa normalmente utilizando una técnica matemática conocida como **transformada de Laplace**, la cual emplea como variable la frecuencia compleja (**s**) en lugar del tiempo (**t**). En la **figura 2.7** se muestran las funciones de transferencia de algunos bloques básicos de sistemas eléctricos y mecánicos.

Las flechas que conectan los bloques indican la dirección del flujo de señales. En general, cualquier señal sólo puede pasar en la dirección indicada por las flechas, es decir de la entrada a la salida. Asimismo, la señal de salida de cada bloque (Eo) es el producto de la señal de entrada (Ei) por la función de transferencia del mismo (G(s)). Esto es:

$$Eo = Ei \times G(s)$$

Otros elementos importantes relacionados con los diagramas de bloques son los puntos de suma y los puntos de ramificación.

Los **puntos de suma** se representan como se indica en la **figura 2.8** y corresponden a los detectores de error, encargados de comparar o mezclar las señales de entrada y de realimentación para producir una señal de error. El signo más (+) o menos (-) en cada punta de flecha, indica si la señal correspondiente debe sumarse o restarse.

En nuestro caso, la señal "a" debe sumarse y la señal "b" debe restarse. Por tanto, la señal de salida del punto de suma es siempre igual a la diferencia entres las señales "a" y "b", es decir "a-b". De este modo, si "a" es una onda seno de 1Vpp y "b" un nivel DC de 2V, se obtiene entonces una onda seno de 1Vpp con un nivel DC de -2V.

Los **puntos de ramificación** representan los puntos donde una misma señal se desdobla en dos o más ramas que van a otros bloques funcionales o puntos de suma. En la **figura 2.9** se muestra un sistema de control de lazo cerrado genérico representado mediante un diagrama de bloques. En el mismo se indican también los elementos antes mencionados.

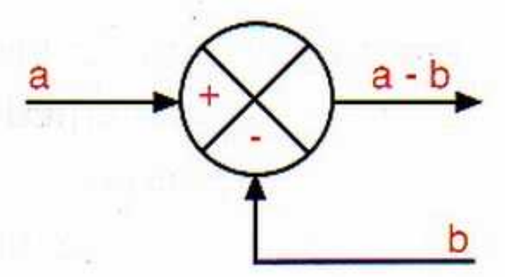


Figura 2.8 Representación de un punto de suma en un diagrama de bloques

En este caso, R(s), B(s), E(s) y C(s) corresponden, en su orden, a las señales de entrada, realimentación, error y salida, mientras que G(s) y H(s) son las funciones de transferencia de los bloques de control y de realimentación, respectivamente. Todos estos parámetros se relacionan así:

$$C(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} R(s)$$

siendo C(s)/E(s)=G(s) y B(s)/E(s)=G(s)H(s). Típicamente, H(s) representa la función de conversión del sensor, por ejemplo la relación entre el voltaje de salida de un sensor de presión y la presión del proceso que está monitoreando.

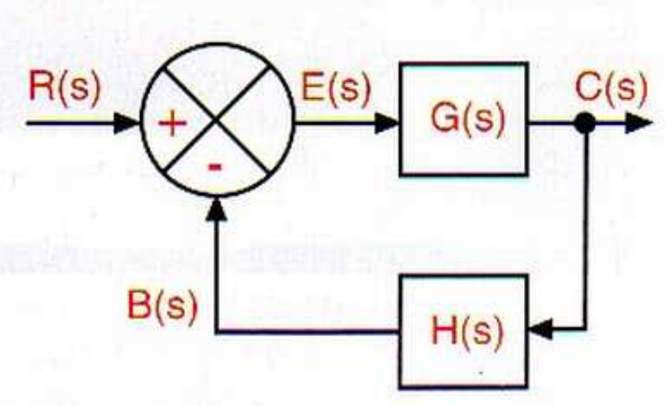


Figura 2.9 Diagramas de bloques de un sistema de lazo cerrado genérico

Existen varias ventajas derivadas de la representación de sistemas de control mediante diagramas de bloques. Por ejemplo, son fáciles de crear y permiten apreciar fácilmente la operación de un sistema, así como la contribución de cada elemento al desempeño general del mismo. Además, un mismo diagrama puede representar muchos sistemas diferentes y no relacionados.

Análisis y diseño de sistemas de control. Modelado

El primer y más importante paso en el proceso de análisis y diseño de un sistema de control automático es desarrollar alguna forma de **modelo** matemático idealizado que describa, de la manera más aproximada a la realidad, el comportamiento de la planta y permita predecirlo sin necesidad de disponer del sistema físico como tal. Un modelo puede ser, por ejemplo, un juego de ecuaciones procesadas por una computadora digital o una red neuronal artificial entrenada para imitar el comportamiento de la planta en base a observaciones o reglas derivadas de la experiencia humana.

Los modelos se utilizan en todas las áreas de aplicación del control, incluyendo sistemas mecánicos, hidráulicos, neumáticos, térmicos, químicos, biológicos, económicos, etc., especialmente cuando, por razones de costos, complejidad, seguridad o de otra índole, no es posible o práctico construir el sistema real, o experimentar físicamente sobre él. Por ejemplo, antes de construir, probar e incorporar un nuevo controlador para un transbordador, los ingenieros aeroespaciales tienen que analizarlo y perfeccionarlo en base a un modelo matemático de la nave misma en vuelo porque, simplemente, no hay otra alternativa, **figura 2.10**.

Figura 2.10. Antes de construir físicamente un controlador para un proceso o mecanismo, es necesario primero analizarlo y perfeccionarlo en base a un modelo matemático idealizado, pero realista, del mismo. Para los ingenieros de la NASA, por ejemplo, no hay otra opción. Literalmente, las naves espaciales diseñadas por ellos salen del computador, como lo sugiere la ilustración.

De cualquier manera, un modelo es una idealización de la realidad y es, por tanto, inherentemente inexacto puesto que se deben hacer varias suposiciones para simplificarlo. Por esta razón, un sistema de control basado en un modelo debe ser diseñado de modo que sea **robusto**, es decir que tenga en cuenta todos los factores críticos necesarios para garantizar el buen desempeño de la planta y sea capaz de acomodarse a las **incertidumbres** del modelo matemático de la misma, es decir los factores o perturbaciones no considerados o ignorados deliberadamente en su concepción original.

Como ejemplo, consideremos el caso de un motor eléctrico DC que debe accionar una carga mecánica cualquiera, por ejemplo una máquina bobinadora. Para desarrollar un modelo

matemático del mismo, sencillo pero eficiente, debemos inicialmente definir y estructurar el problema, especificando claramente cuál es el propósito y uso intencionado del modelo, cuáles son sus limitaciones y fronteras, y qué simplificaciones pueden ser hechas para facilitar su tratamiento matemático.

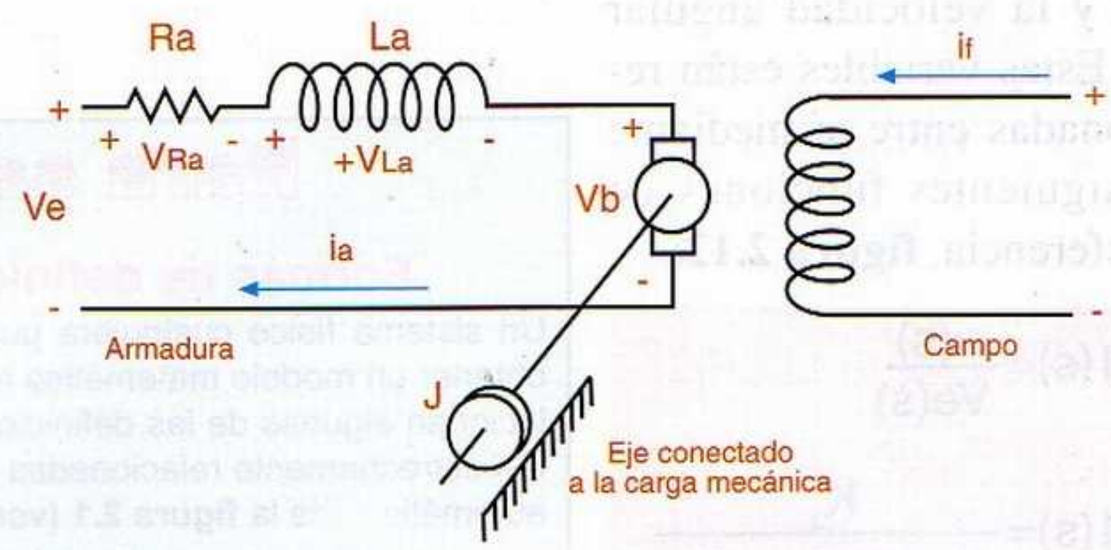


Figura 2.11 Circuito equivalente de un motor DC de excitación separada. La velocidad (ω) y el torque (T) se controlan variando la corriente de armadura (Ia) mediante el voltaje Ve. La excitación de las bobinas de campo se realiza mediante una corriente constante (If). Este método proporciona una mejor estabilidad de la velocidad y un mayor torque.

Nota metodológica: La explicación que sigue puede parecer algo complicada a los lectores no familiarizados con procesos analíticos y la aplicación de métodos matemáticos a la solución de problemas físicos. Sin embargo, no se preocupe porque esta no va a ser la tónica de nuestro curso, en el cual siempre haremos énfasis en los aspectos conceptuales y prácticos. La parte matemática, cuando sea necesario incluirla, la dejaremos para que sea resuelta por una computadora utilizando una de las muchas ayudas de software disponibles para tal efecto, como el excelente programa **MATLAB** (**MAT**rix **LAB**oratory: laboratorio de matrices), desarrollado por la firma **MathWorks** y cuyo uso recomendamos.

En nuestro caso, podemos asumir que el motor DC es un sistema lineal, de parámetros concentrados, determinístico, de tiempo continuo e invariante en el tiempo (ver el recuadro **"Formas de definición de sistemas físicos"**) porque el comportamiento del mismo se puede describir mediante ecuaciones algebraicas y diferenciales lineales sencillas, todos sus parámetros importantes son conocidos o se pueden conocer, los mismos no varían considerablemente con el tiempo, etc. Estas suposiciones no son arbitrarias, sino que están basadas en el conocimiento que del motor (la planta) tiene el diseñador por sus estudios y experiencia.

Bajo las condiciones anteriores, podemos representar el motor mediante un circuito equivalente como el de la **figura 2.11**, donde **Ra**, **La**, **Ia**, **Vb** y **Ve** corresponden, respectivamente, a la resistencia, la inductancia, la corriente, la fuerza contraelectromotriz inducida y el voltaje de control del devanado rotórico o armadura, e **If** a la corriente de excitación del devanado estatórico o de campo (*field*, en inglés). Asimismo, **T** y ω (omega) representan, en su orden, el torque o par y la velocidad angular que le imprime el motor a la carga. Estos y otros conceptos se explican en detalle en la sección de **Electricidad Industrial**.

Una vez definido, estructurado y visualizado el problema, el siguiente paso es identificar las entradas y salidas del sistema, así como las variables, constantes y parámetros importantes del mismo. En nuestro caso, la variable de entrada es el voltaje de control (Vs), mientras que las variables de salida son el torque útil

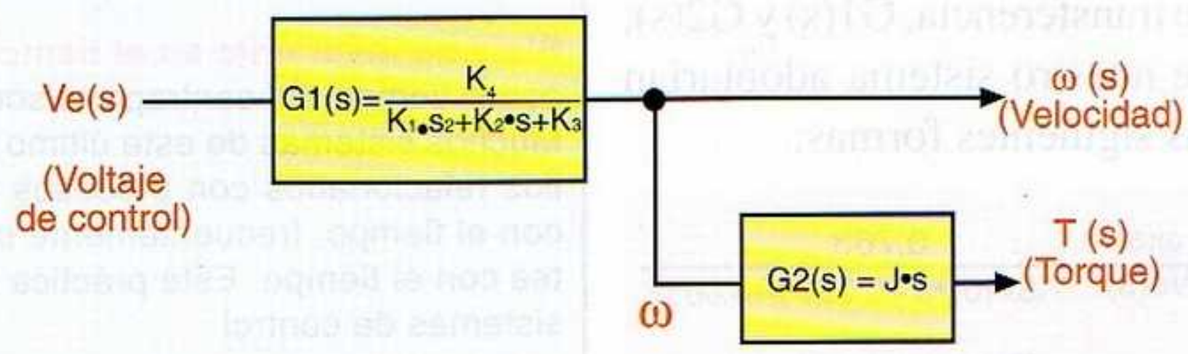


Figura 2.12 Diagrama de bloques simplificado del sistema electromecánico de la figura 2.11.

(Tc) y la velocidad angular (ω). Estas variables están relacionadas entre sí mediante las siguientes funciones de transferencia, **figura 2.12**:

$$G1(s)=\frac{\omega(s)}{Ve(s)}$$

$$G1(s)=\frac{K_4}{K_1 \bullet s^2+K_2 \bullet s+K_3}$$

$$G2(s)=\frac{Tc(s)}{\omega(s)}=J \bullet s$$

siendo K_1, K_2, K_3 y K_4 constantes propias del sistema. Específicamente, $\mathbf{K_4}$=Kt, $\mathbf{K_3}$=B•Ra + Kt•Kb, $\mathbf{K_2}$= J•Ra + B•La y $\mathbf{K_1}$=J•La, donde **Kt** y **Kb** son las constantes de torque y *fem* inducida, **B** el coeficiente de amortiguamiento y **J** el momento de inercia del sistema rotatorio completo (ver recuadro **Definición de parámetros ...**). Los valores reales de estos parámetros pueden ser estimados por experiencia, derivados de las hojas de datos del motor y demás elementos, o medidos experimentalmente.

Por ejemplo, si **Kt**= 0.763 N•m/A, **Kb**=2.122x10^{-4} V•s, **J**=0.10 kg•m^2, **B**=0.0059 N•m•s, **La**=0.78 mH y **Ra**= 0.51 Ω, entonces las funciones de transferencia, G1(s) y G2(s), de nuestro sistema adoptarían las siguientes formas:

$$\frac{\omega(s)}{Ve(s)}=\frac{0.763}{7.8\times10^{-5} \bullet s^2+0.051 \bullet s+0.0032}$$

$$\frac{Tc(s)}{\omega(s)}=0.1 \bullet s$$

Para saber más

Formas de definición de sistemas físicos

Un sistema físico cualquiera puede ser definido de muchas formas para obtener un modelo matemático adecuado del mismo. A continuación se relacionan algunas de las definiciones más comunes. Estas definiciones están estrechamente relacionadas con la clasificación de sistemas de control automáticos de la **figura 2.1** (ver página 8).

Sistema dinámico cuyo comportamiento puede ser descrito solamente mediante ecuaciones **diferenciales** o de **diferencia**. Su contraparte son los sistemas **estáticos**, los cuales pueden ser representados mediante ecuaciones **algebraicas**, que son más simples. Ambos tipos son muy comunes en el mundo real.

Sistema lineal. Sistema que puede ser representado mediante ecuaciones lineales. La mayoría de sistemas del mundo real, sin embargo, son **no lineales**, pero se aproximan a modelos lineales dentro del rango de interés para simplificar su análisis. Esta práctica es muy común en el diseño de sistemas de control.

Sistema de parámetros concentrados. Sistema que puede ser representado mediante ecuaciones diferenciales o de diferencia ordinarias. Muchos sistemas, sin embargo, son de **parámetros distribuidos**, es decir su comportamiento depende tanto del tiempo como del espacio y deben ser descritos mediante ecuaciones **diferenciales parciales**. No obstante, los mismos pueden ser frecuentemente aproximados como sistemas de parámetros concentrados, que son más fáciles de analizar. Esta práctica es muy común en el diseño de sistemas de control.

Sistema determinístico. Sistema cuyas entradas y parámetros se conocen exactamente, es decir no son aleatorios. Su contraparte son los sistemas **estocásticos**, en los cuales por lo menos una entrada o parámetro es afectado por perturbaciones no predecibles, por ejemplo ruidos o interferencias externas. Estas perturbaciones pueden o no ser ignoradas dependiendo del grado de exactitud requerido.

Sistema de tiempo continuo. Sistema que puede ser representado mediante ecuaciones diferenciales. La mayoría de sistemas físicos son de este tipo. Su contraparte son los sistemas de **tiempo discreto** o **muestreados**, los cuales se representan mediante ecuaciones de diferencia. Muchos sistemas continuo, sin embargo, frecuentemente son modelados como sistemas discretos para poderlos diseñar o controlar utilizando una computadora digital. Esta práctica es muy común en el diseño de sistemas de control modernos.

Sistema invariante en el tiempo. Sistema cuyos parámetros no varían con el tiempo. Su contraparte son los sistemas **variantes con el tiempo**. Muchos sistemas de este último tipo, sin embargo, especialmente aquellos relacionados con procesos cuyos parámetros cambian lentamente con el tiempo, frecuentemente son modelados como sistemas invariantes con el tiempo. Esta práctica es también muy común en el diseño de sistemas de control.

En la gráfica de la **figura 2.13** se muestra cómo varían la velocidad (ω) y el par útil (Tc) para un motor DC representado por un modelo como el de la **figura 2.11**. Observe que la relación entre la velocidad y el voltaje de control es prácticamente lineal.

Asimismo, el torque disminuye a medida que aumenta la velocidad, y viceversa. Por tanto, para un determinado voltaje de armadura, el par es mayor a bajas velocidades que a altas. Esto demuestra que nuestro modelo se comporta en la práctica tal como fue previsto y es **estable**, es decir la salida (ω) sigue fielmente la entrada (Ve).

Diseño del controlador. Opciones disponibles

Una vez ha sido desarrollado y verificado el modelo de una planta, el siguiente paso es diseñar el sistema de control de la misma. Las opciones disponibles son muy variadas, dependiendo de los objetivos específicos buscados, por ejemplo estabilidad, velocidad de respuesta, reducción del consumo de energía, etc. Un primer enfoque es recurrir a técnicas de **control clásico**, basadas en el análisis en el dominio de la frecuencia, las cuales hacen uso extensivo de la **transformada de Laplace** para sistemas continuos y la llamada **transformada z** para sistemas discrètos.

Las técnicas clásicas son adecuadas para sistemas con una entrada y una salida, como el descrito anteriormente. Sin embargo, pierden su solidez ante sistemas con muchas entradas y salidas. En estos casos, debe recurrirse a técnicas de **control moderno**, basadas en el análisis en el dominio del tiempo, las cuales hacen uso extensivo de los conceptos de **estado**, **variables de estado**, **vector de estado** y **espacio de estados**. Este tipo de enfoque, que es particularmente adecuado para su implementación por computadora, se examina en detalle en el **Capítulo 18** de esta sección del curso.

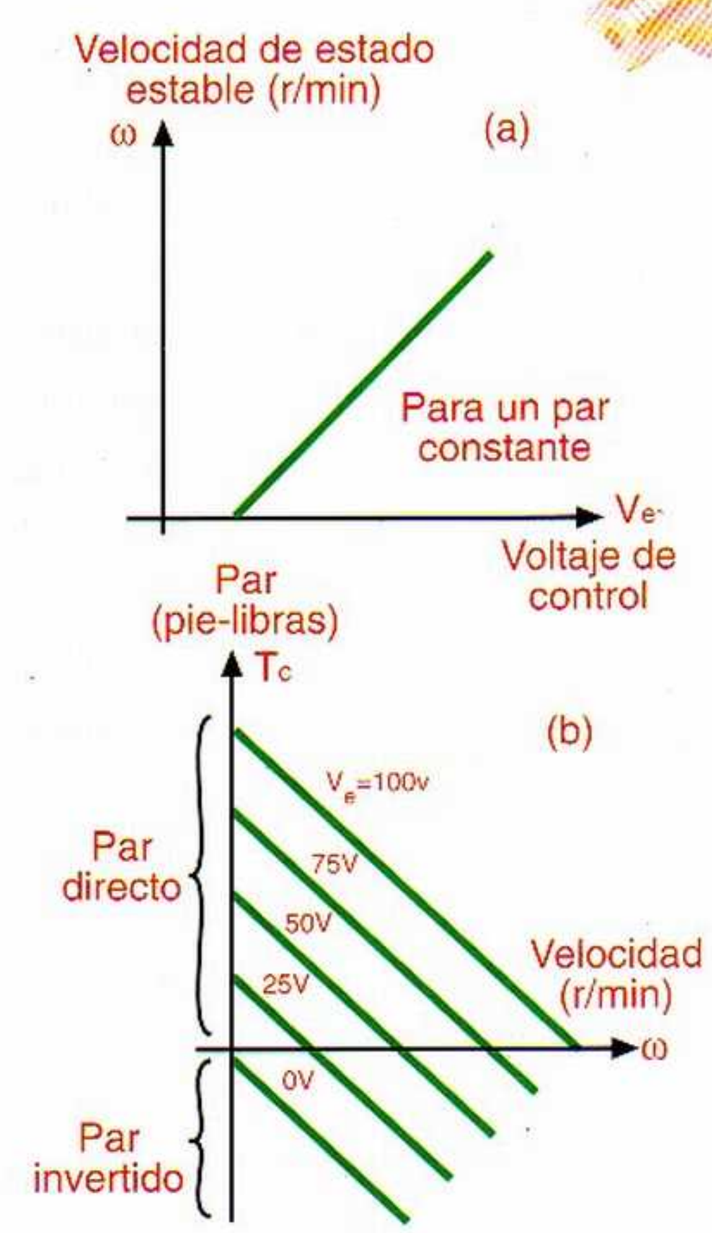


*Figura 2.13 Características de velocidad **(a)** y torque **(b)** típicas con excitación independiente de un motor DC*

Para saber más

Definición de los principales parámetros físicos involucrados en el sistema electromecánico de la figura 2.11

Kt : Constante de torque o par. Representa la relación entre el torque electromagnético desarrollado por el rotor (T_e) y la corriente de armadura (I_a). Esto es, $T_e=K_t \bullet I_a$.

Kb: Constante de fem. Representa la relación entre la fuerza contraelectromotriz inducida (V_b) y la velocidad angular (ω). Esto es: $V_b=K_b \bullet \omega$. Por definición, ω es la rata de cambio de θ, es decir $\omega=d\theta/dt$ (léase como "ω es la primera derivada de θ") en el dominio del tiempo, o $\omega = s \bullet \theta$ (léase como "ω es ese por θ") en el dominio de la frecuencia.

Ra: Resistencia equivalente del devanado rotórico. Por la Ley de Ohm, R_a es la relación entre V_{Ra} e I_a. Esto es: $V_{Ra}=R_a \bullet I_a$

La: Inductancia equivalente del devanado rotórico . Por definición, L_a es la relación entre V_{La} y la rata de cambio de la (dI_a/dt). Esto es: $V_{La}=L_a \bullet (dI_a/dt)$ o $V_{La}=L_a \bullet s \bullet I_a$. Asimismo, por la primera Ley de Kirchoff, V_e debe ser igual a a la suma de V_{Ra}, V_{La} y V_b. Esto es: $V_e=V_{Ra} + V_{La} + V_b$

B: Coeficiente de amortiguación. Representa la relación entre el torque de fricción (T_r) y la velocidad angular (ω). Esto es: $T_r=B \bullet \omega$ o $T_r= B \bullet (d\theta/dt)$ o $T_r = B \bullet s \bullet \theta$

J: Momento de inercia del sistema rotatorio completo, incluyendo el rotor, la carga, el eje y los elementos de acoplamiento. Representa la relación entre el torque útil (T_c) y la aceleración angular (α). Esto es: $T_c=J \bullet \alpha$. Por definición, α es la rata de cambio de ω, es decir $\alpha=d\omega/dt$ (léase como "α es la primera derivada de ω) o $\alpha=d^2\theta/d^2t$ (leáse como "α es la segunda derivada de θ"). Por tanto, $T_c=J \bullet (d^2\theta/d^2t)$ o $T_c=J \bullet s^2 \bullet \theta$. Asimismo, el torque útil (T_c) es la diferencia entre el torque desarrollado por el rotor (T_e) y el torque de fricción (T_r). Esto es: $T_c=T_e-T_r$

Un nivel de sofisticación más avanzado se consigue recurriendo a técnicas de **control inteligente**, basadas principalmente en el uso de **redes neuronales** artificiales y **lógica difusa** (*fuzzy logic*), e inspiradas en modelos biológicos de aprendizaje e inteligencia. Este tipo de enfoque, que se examina en detalle en la sección de **Automatización** de este curso, es potencialmente capaz de proporcionar un nivel de robustez muy elevado, no obtenible con ninguna otra técnica de control.

Naturalmente, existen otros enfoques al diseño de sistemas de control. Estos incluyen técnicas como el **control predictivo**, el **control de estructuras variables**, el **control secuencial**, etc. El control predictivo, por ejemplo, está típicamente asociado con el control de procesos, mientras que el control de estructuras variables lo está con el de servomecanismos. El control secuencial, por su parte, está principalmente ejemplarizado en los controladores lógicos programables (PLCs). Estas y otras técnicas, se examinan en la sección de **Automatización**.

Para finalizar, en la **figura 2.14** se muestra un *drive* o controlador electrónico de velocidad y torque para motores DC hasta de 1/3 HP, diseñado por la firma *Bodine* y basado en técnicas de control clásico. El sistema se alimenta de la red AC de 115V y produce voltajes de control DC desde 0 hasta 130V, permitiendo variar la velocidad del motor desde 0 hasta el 100% de su valor máximo. La conversión de AC a DC la realiza un rectificador controlado de tiristores. Este tipo de sistemas se estudia en detalle en la sección de **Electrónica de Potencia** de este curso.

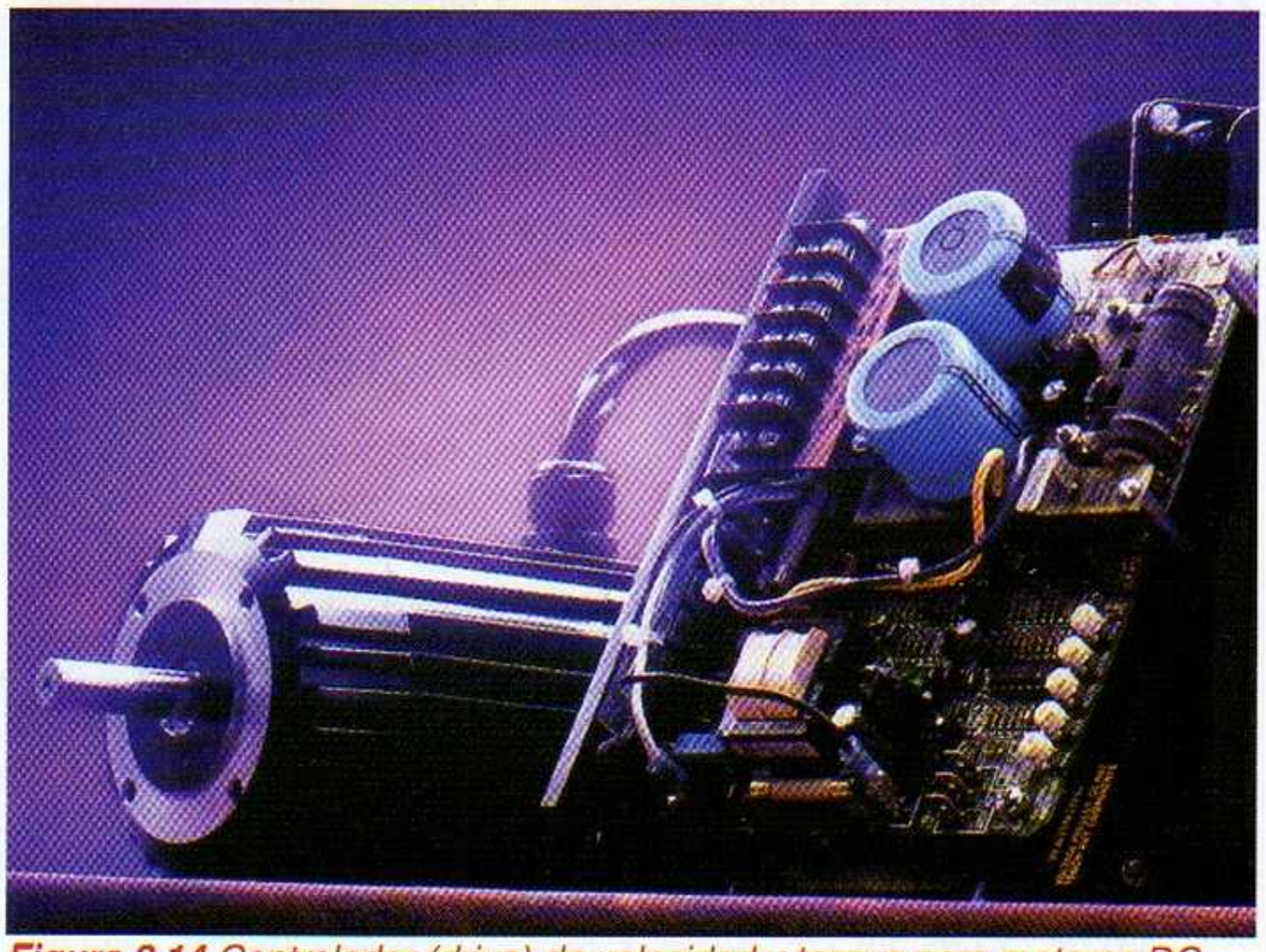


Figura 2.14 *Controlador (drive) de velocidad y torque para motores DC hasta de 1/3 HP basado en técnicas de control clásico. Su fabricante es* ***Bodine Electric Company*** *(http://www.bodinemtr.com).*

Análisis de estabilidad. Métodos comunes

Para ser útil, un sistema de control automático necesita, ante todo, ser **estable**, es decir capaz de seguir la señal de referencia o de comando de una manera confiable. Por esta razón, al diseñar un sistema de control, debemos ser capaces de predecir su comportamiento dinámico a partir del conocimiento de sus componentes, siendo la consideración más importante la determinación de su **estabilidad**, absoluta o relativa, sobre bases analíticas.

Actualmente se dispone de una gran variedad de técnicas para analizar la estabilidad de sistemas realimentados y convertir sistemas inestables en estables. Estas incluyen, por ejemplo, el criterio de Routh-Horwitz, la prueba de Jury, la respuesta de frecuencia, el criterio de Nyquist, el método de Liapunov, el método del lugar de las raíces, la técnica de predicción de Smith, y otras por el estilo, algunas de las cuales serán examinadas en su debida oportunidad.

Los criterios de Nyquist y de Routh-Horwitz, en particular, son solamente aplicables a sistemas lineales e invariantes con el tiempo. Para sistemas no lineales y/o variantes con el tiempo debe recurrirse a otras técnicas, siendo la más general el método de Liapunov, aplicable también al análisis de sistemas lineales e invariantes con el tiempo. Ω

Capítulo 3

Sensores y dispositivos de medición

Los sensores constituyen el principal medio de enlace entre los procesos industriales y los circuitos electrónicos encargados de controlarlos o monitorearlos. Este capítulo examina los conceptos generales relacionados con los sensores eléctricos, haciendo énfasis en los principales tipos disponibles para aplicaciones industriales, sus principios de funcionamiento y la interpretación de sus características estáticas y dinámicas

Generalidades

Los **sensores** o **transductores**, en general, son dispositivos que transforman una cantidad física cualquiera, por ejemplo la temperatura, en otra cantidad física equivalente, digamos un desplazamiento mecánico. En este capítulo nos referiremos principalmente a los sensores **eléctricos**, es decir aquellos cuya salida es una señal eléctrica de corriente o voltaje, codificada en forma análoga o digital. Los sensores posibilitan la comunicación entre el mundo físico y los sistemas de control, tanto eléctricos como electrónicos, utilizán-

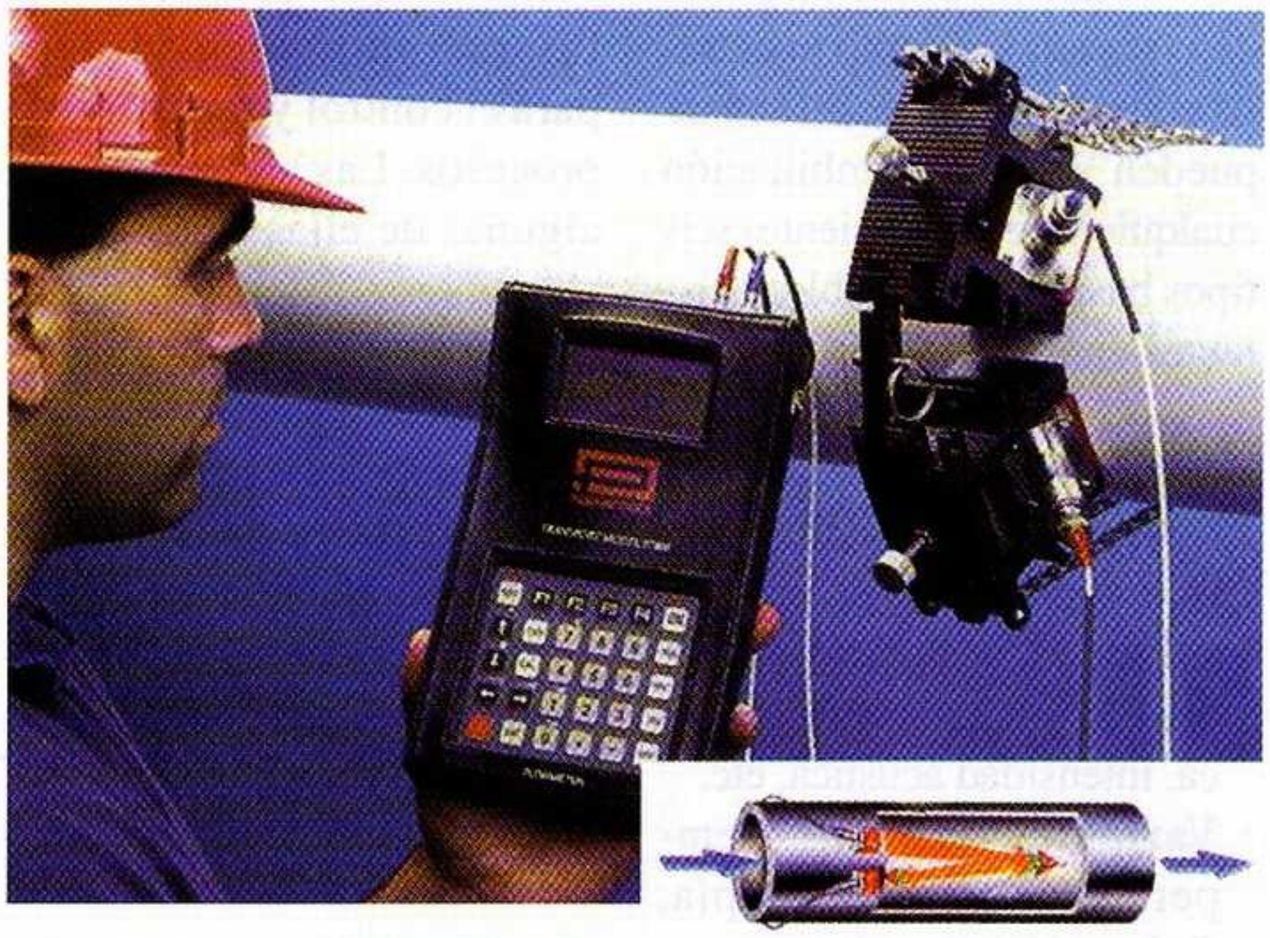


*Figura 3.1. Los sensores proporcionan el enlace entre los procesos del mundo físico y los equipos electrónicos o eléctricos que los controlan o monitorean. En la fotografía se ilustra el uso de un sensor ultrasónico, formado por un emisor y un receptor de ultrasonidos, para medir el caudal o la velocidad de flujo de un líquido a través de una tubería (Cortesía de **Panametrics**).*

dose extensivamente en todo tipo de procesos industriales y no industriales para propósitos de monitoreo, control y procesamiento, **figura 3.1**.

En un sentido más amplio, el uso de los sensores no se limita solamente a la medición o la detección de cantidades físicas. También pueden ser empleados para medir o detectar propiedades químicas y biológicas. Asimismo, la salida no siempre tiene que ser una señal eléctrica. Por ejemplo, muchos termómetros utilizan como sensor una lámina bimetálica, formada por dos metales con diferentes coeficientes de dilatación, la cual produce un desplazamiento (señal mecánica) proporcional a la temperatura (señal térmica).

De hecho, desde un punto de vista teórico, tanto la entrada como la salida de un sensor pueden ser una combinación cualquiera de los siguientes seis tipos básicos de variables existentes en la naturaleza:

- **Variables mecánicas**. Longitud, área, volumen, flujo másico, fuerza, torque, presión, velocidad, aceleración, posición, longitud de onda acústica, intensidad acústica, etc.
- **Variables térmicas**. Temperatura, calor, entropía, flujo calórico, etc.
- **Variables eléctricas**. Voltaje, corriente, carga, resistencia, inductancia, capacitancia, constante dieléctrica, polarización, campo eléctrico, frecuencia, momento dipolar, etc.
- **Variables magnéticas**. Intensidad de campo, densidad de flujo, momento magnético, permeabilidad, etc.
- **Variables ópticas**. Intensidad, longitud de onda, polarización, fase, reflectancia, transmitancia, índice de refracción, etc.
- **Variables químicas o moleculares**. Composición, concentración, potencial redox, rata de reacción, pH, olor, etc.

En la práctica de la electrónica industrial, sin embargo, los sensores preferidos, y a los cuales dedicaremos la mayor atención en este curso, son aquellos que ofrecen una señal de salida eléctrica. Ello se debe a las numerosas ventajas que proporcionan los métodos electrónicos para el control y medición de procesos. Las siguientes son algunas de ellas:

- Debido a la naturaleza eléctrica de la materia, cualquier variación de un parámetro no eléctrico (temperatura, humedad, presión, etc..) viene siempre acompañada por la variación de un parámetro eléctrico (resistencia, capacitancia, inductancia, etc.). Esto permite realizar sensores eléctricos prácticamente para cualquier variable, eléctrica o no eléctrica. Lo importante es seleccionar el material adecuado.

- Se pueden implementar sensores **no intrusivos**, es decir que no extraen energía del sistema bajo medición. Esta operación se realiza mediante el uso de técnicas de amplificación. También se dispone de una gran variedad de recursos para acondicionar o modificar las señales a necesidades particulares, así como para presentar o registrar la información suministrada. Muchos de estos recursos (filtros, circuitos de linealización, convertidores A/D, pantallas, etc.), vienen incluso incorporados de fábrica en los sensores mismos, lo cual facilita su uso.

- La transmisión de señales eléctricas es más versátil, limpia y segura que la de otros tipos de señales (mecánicas, hidráulicas, neumáticas, etc.). No obstante, estas últimas pueden ser más convenientes en algunas situaciones específicas, por ejemplo atmósferas explosivas o altamente ionizadas.

Figura 3.2 Estructura genérica de un sensor. Este último puede utilizar uno o más principios de transducción con el fin de producir una salida útil en respuesta a la cantidad, propiedad o condición física que se desea medir.

Estructura y principio de funcionamiento

Todos los sensores utilizan uno o más principios físicos o químicos para convertir una variable de entrada al tipo de variable de salida más adecuado para el control o monitoreo de cada proceso particular. Estos principios o fenómenos se manifiestan en forma útil en ciertos materiales o medios y pueden estar relacionados con las propiedades del material en sí o su disposición geométrica.

En el caso de sensores cuya salida es una señal eléctrica, la obtención de esta última implica generalmente el uso de un **transductor primario** y, opcionalmente, uno o más **transductores secundarios**, como se ilustra en la **figura 3.2.**

La función del **transductor primario** es convertir la magnitud física a medir en otra más fácil de manipular. Esta última no tiene que ser necesariamente de naturaleza eléctrica.

Por ejemplo, un bimetal, que es un dispositivo formado por dos metales de distintos coeficientes de dilatación, es un tipo de transductor primario porque convierte una variación de temperatura en un desplazamiento físico equivalente. Este último puede ser utilizado para mover una aguja o accionar un interruptor. Otros ejemplos son los los tubos de Bourdon (presión), los tubos de Pitot (velocidad de flujo), los rotámetros (caudal), los flotadores (nivel), las termocuplas (temperatura), etc.

El **transductor o transductores secundarios**, cuando son requeridos, actúan sobre la salida del transductor primario para producir una señal eléctrica equivalente. Una vez obtenida, esta última es sometida a un proceso de acondicionamiento y amplificación para ajustarla a las necesidades de la carga exterior o de la circuitería de control.

Como ejemplo, considérese el sensor electrónico de presión mostrado en la **figura 3.3**. En este caso, la presión asociada con el fluido se traduce inicialmente en un desplazamiento o deflexión proporcional utilizando como transductor primario un diafragma u otro elemento elástico especialmente diseñado para esta función.

A continuación, esta deflexión es convertida en una señal eléctrica equivalente utilizando como transductor secundario una galga extensiométrica semiconductora u otro tipo de elemento especialmente diseñado para convertir movimiento en electricidad.

Por último, la señal eléctrica producida se acondiciona, modifica o procesa mediante circuitos electrónicos adecuados con el fin de obtener la respuesta y las características finales deseadas (en este caso un voltaje entre 0 y 5V proporcional a valores de presión absoluta entre 0 y 6000 psi con una exactitud de ±.0.5%).

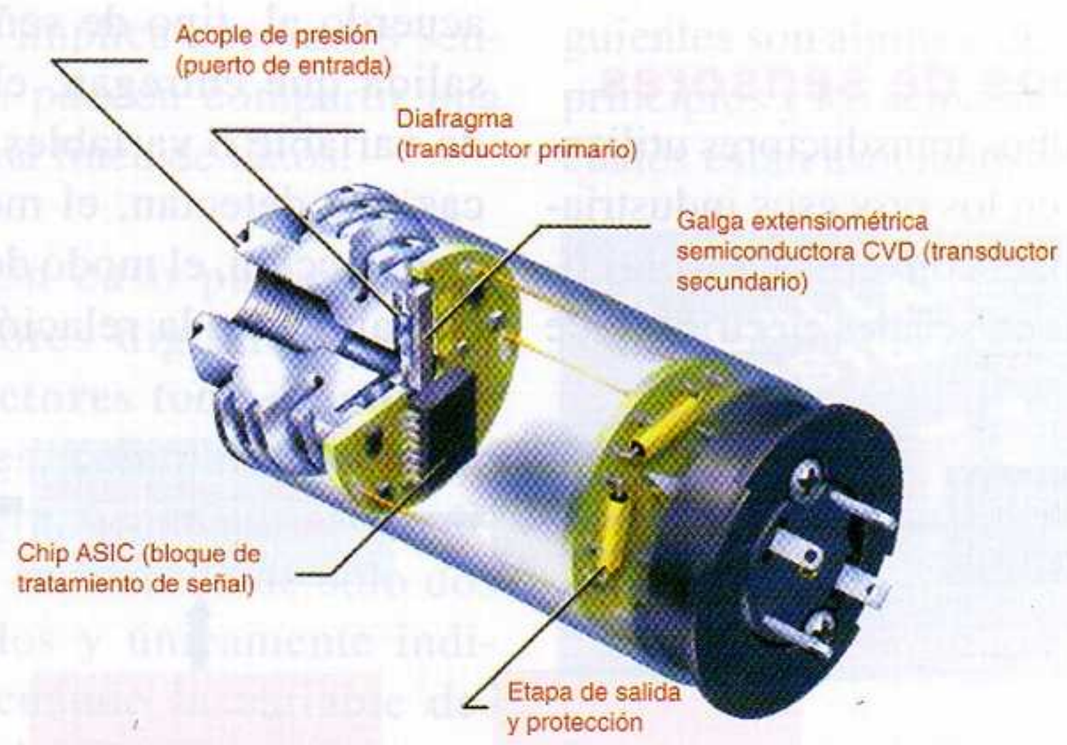


Figura 3.3 . Estructura interna de un sensor de presión absoluta para trabajo pesado. El dispositivo mostrado, fabricado por ***Gems*** *(www.gemssensors.com) y capaz de detectar presiones desde 0 (vacío) hasta 6000 PSI, utiliza un diafragma como transductor primario, una galga extensiométrica semiconductora (CVD) como transductor secundario y un circuito integrado de aplicación específica (ASIC) como bloque de tratamiento de señal. También cuenta con protección contra EMI y RFI.*

La circuitería anterior constituye el **bloque de tratamiento de señal**. Adicionalmente, muchos sensores incluyen una **etapa de salida**, conformada por relés, amplificadores de potencia, conversores de código, transmisores, y otros tipos de dispositivos y circuitos, cuya función es adaptar la señal entregada por el bloque de acondicionamiento o tratamiento a las necesidades específicas de la carga.

Generalmente, tanto la etapa de salida como la de tratamiento de señal, incluyen también **circuitos de protección** contra sobrevoltajes, interferencia electromagnética (EMI), interferencia de radiofrecuencia (RFI), y otros fenómenos que son comunes en los ambientes eléctricos industriales.

Tipos de sensores

Muchos transductores utilizados en los procesos industriales para convertir variables físicas en señales eléctricas o de otro tipo, necesitan de una o más fuentes auxiliares de energía para realizar su acción básica, **figura 3.4**. Los sensores basados en este tipo de transductores se denominan **activos** o **moduladores** y se emplean principalmente para medir señales débiles.

La contraparte de los sensores activos son los sensores **pasivos** o **generadores**, los cuales pueden realizar su acción básica de transducción sin la intervención de una fuente de energía auxiliar. Un ejemplo lo constituyen las **termocuplas** o **termopares**, las cuales producen directamente un voltaje de salida proporcional a la temperatura aplicada.

Además de la distinción entre **pasivos** y **activos**, los sensores electrónicos pueden ser también clasificados de acuerdo al tipo de señal de salida que entregan, el tipo de variable o variables físicas que detectan, el método de detección, el modo de funcionamiento, la relación entre la entrada y la salida (función de transferencia) y otros criterios, **figura 3.5**. Dentro de cada una de estas clasificaciones existen sus propias subcategorías.

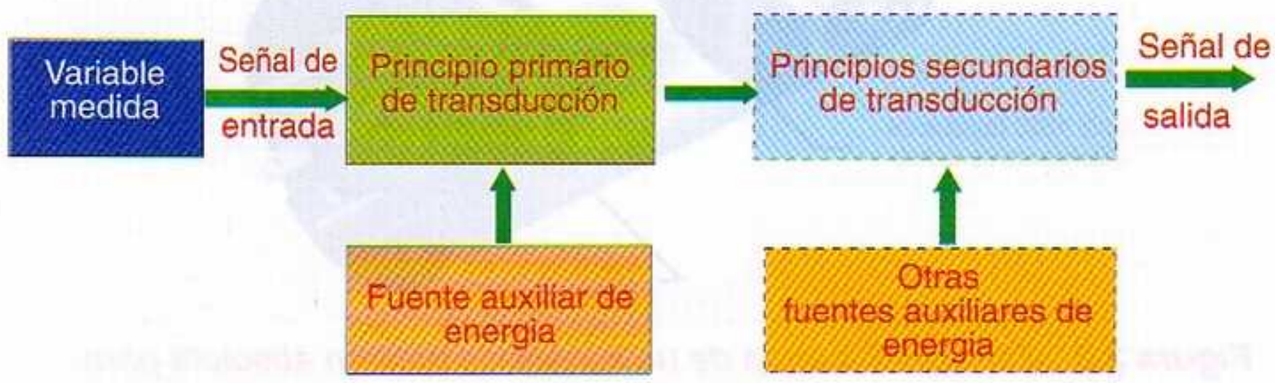


Figura 3.4. Estructura genérica de un sensor activo. Este último requiere de una o más fuentes de energía para alimentar el transductor primario y los transductores secundarios.

Dependiendo del tipo de señal de salida, por ejemplo, un sensor puede ser **analógico** o **digital**. Los **sensores analógicos** entregan como salida un voltaje o una corriente continuamente variable dentro del campo de medida especificado. Los rangos de voltaje de salida son muy variados, siendo los más usuales +10V, +5V, ±10V, ±5V y ±1V.

Los rangos de corriente de salida están más estandarizados, siendo actualmente el más común el de **4 a 20 mA**, donde 4 mA corresponde a cero en la variable medida y 20 mA a la escala plena. También existen sensores con rangos de salida de 0 a 20mA y de 10 a 50mA. La salida por *loop* de corriente es particularmente adecuada para ambientes industriales por las siguientes razones:

- Permite ubicar sensores en sitios remotos y peligrosos.
- Permite reducir a dos el número de alambres por sensor.
- Permite aislar eléctricamente los sensores de los instrumentos de medición.
- Proporciona mayor confiabilidad puesto que es relativamente inmune a la captación de ruido y la señal no se degrada cuando se transmite sobre largas distancias.

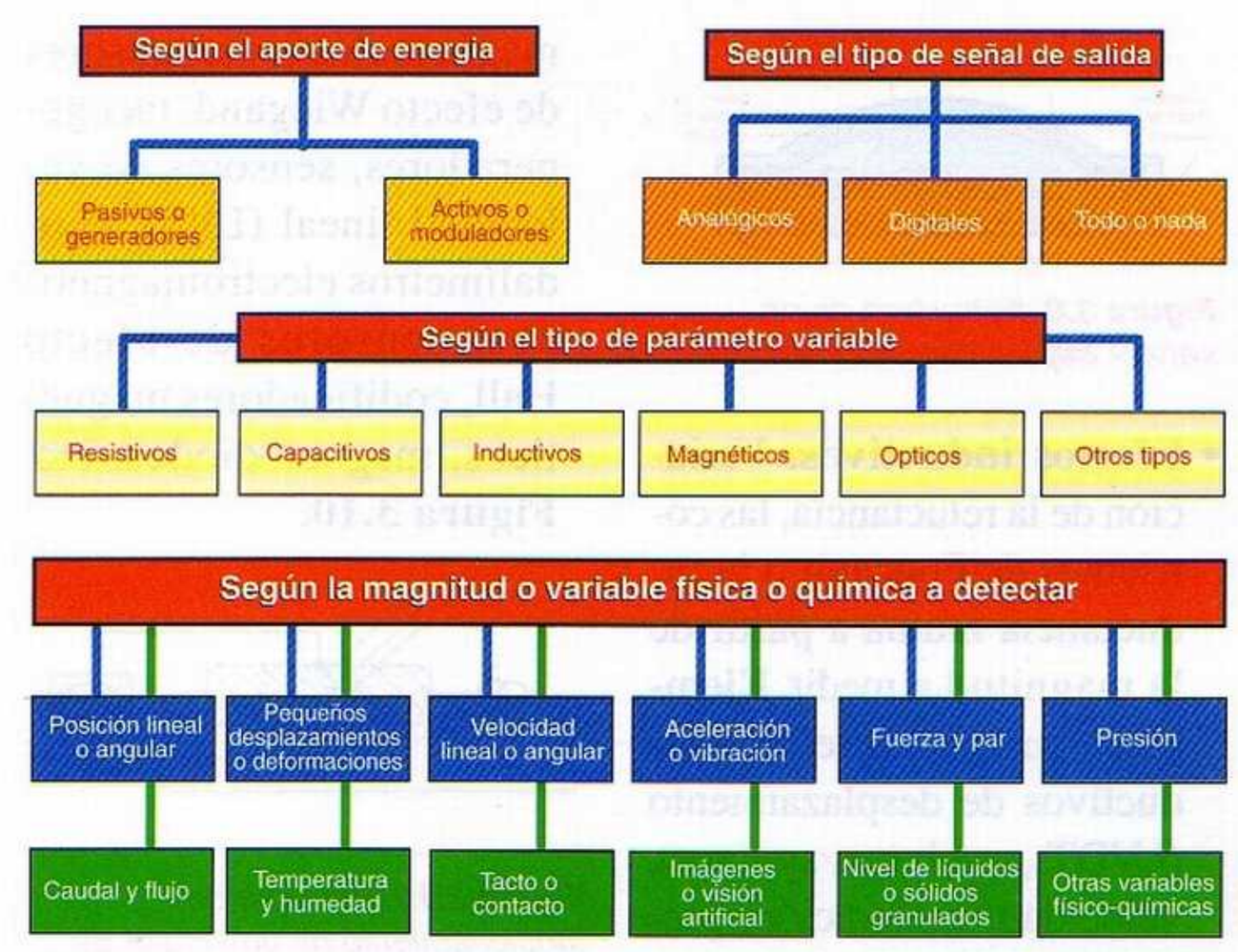


Figura 3.5 Criterios de clasificación comunes de sensores electrónicos

Los **sensores digitales** entregan como salida un voltaje o una corriente variable en forma de saltos o pasos discretos de manera **codificada**, es decir con su valor representado en algún formato de pulsos o palabras, digamos PWM o binario.

Adicionalmente muchos sensores digitales poseen interfaces estándares como RS-232C, RS-422A, RS-485, 1-Wire, HART, etc., lo cual les permite comunicarse directamente con sistemas de control basados en computadoras sobre diferentes trayectos físicos y a muy distintas ratas de bits, **figura 3.6**. Estos protocolos se examinan en detalle en la sección de **Automatización.**

La interface o protocolo **HART** (*Highway Addressable Remote Transducer*), por ejemplo, basada en el estándar de corriente análogo de 4 a 20 mA combinado con técnicas de procesamiento digitales, provee comunicaciones punto a punto y *multidrop* sobre cables hasta de 3,048 metros y a velocidades hasta de 1.2 kbps (kilobits por segundo). La comunicación ***multidrop*** implica que varios sensores pueden compartir una misma línea de datos.

Un caso particular de sensores digitales son los **detectores todo o nada** los cuales, como su nombre lo sugiere, tienen una salida digital codificada de sólo dos estados y únicamente indican cuándo la variable detectada rebasa un cierto valor umbral o límite.

Un ejemplo de sensores todo o nada son los detectores de proximidad inductivos y capacitivos examinados en el **Capítulo 1** de la sección de **Actividades Prácticas**. Otra variante de los sensores digitales son los **sensores cuasidigitales**, los cuales entregan una salida análoga en forma de frecuencia que es relativamente fácil de convertir a una señal digital propiamente dicha.

Dependiendo de la naturaleza de la magnitud o variable a detectar, existen sensores de temperatura, presión, caudal, humedad, posición, velocidad, aceleración, vibración, fuerza, torque, flujo, corriente, gases, pH, proximidad, contacto, imagen, etc. Estos sensores se basan en la aplicación práctica de fenómenos físicos o químicos conocidos y en la utilización de materiales especiales donde dichos fenómenos se manifiestan de forma útil. Los siguientes son algunos de estos principios y los sensores a los cuales están asociados.

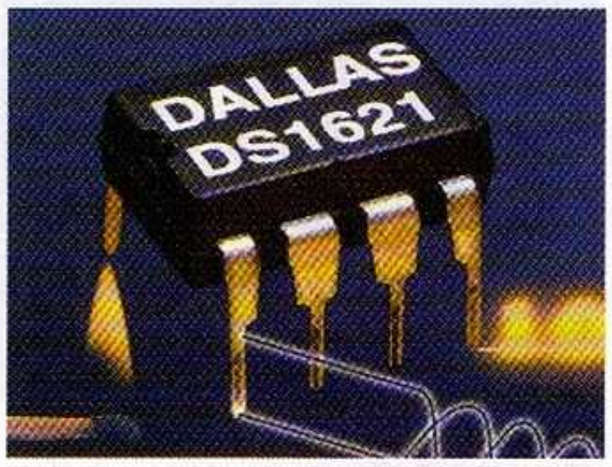


Figura 3.6 Sensor de temperatura digital con interface 1-Wire. El dispositivo mostrado, fabricado por ***Dallas Semiconductor*** *(www.dallas.com), convierte temperaturas desde -55°C hasta +125°C a un número binario de 9 bits con una exactitud de ±1°C.*

- **Efectos resistivos**. Variación de la resistividad o de la conductividad en conductores, semiconductores y aislantes a partir de la magnitud a medir. **Ejemplos**: sensores resistivos de posición (potenciómetros), esfuerzo mecánico (galgas extensiométricas), temperatura (RTDs, termistores), humedad (humistores), campo magnético (magnetorresistencias), luz (fotorresistencias), concentración de gases (SnO_2), etc. **Figura 3.7.**

- **Efectos capacitivos**. Variación de la constante dieléctrica, la separación entre placas o el área de las placas a partir de la magnitud a medir. **Ejemplos**: sensores capacitivos de desplazamiento, proximidad, presión, nivel, humedad, fuerza, inclinación, etc. **Figura 3.8**.

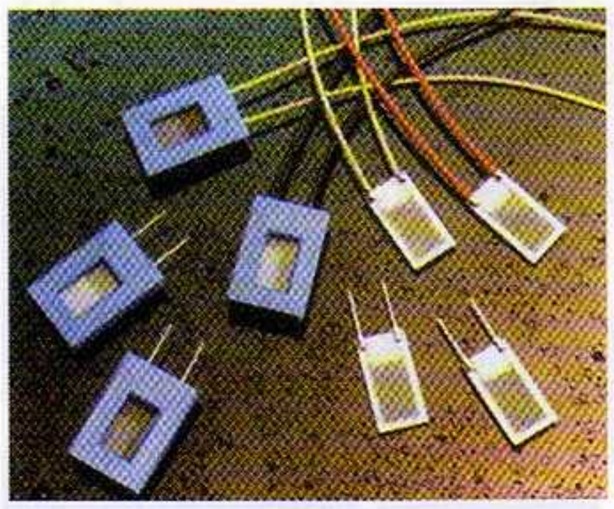


*Figura 3.7. Sensores de humedad resistivos. Estos dispositivos, de la serie **ERH 300** de **Elmwood** (www.elmwoodsensors.com), operan sobre un rango de humedad desde 10% hasta 90% y constan de un sustrato de aluminio sobre el cual se deposita una capa de óxido de zinc-estaño (Zn_2SnO_4) dopado.*

*Figura 3.8. Estructura de un sensor **capacitivo** de inclinación.*

- **Efectos inductivos**. Variación de la reluctancia, las corrientes de Foucault o la inductancia mutua a partir de la magnitud a medir. **Ejemplos**: sensores y detectores inductivos de desplazamiento (LVDTs, resolvers, syncros), velocidad, aceleración, presión, caudal, flujo, nivel, fuerza, etc. **Figura 3.9.**

*Figura 3.9. Sensores de proximidad inductivos de distintos tamaños, formas y rangos de detección. Su fabricante es **SICK** (www.sickoptic.com)*

- **Efectos magnéticos y electromagnéticos**. Producción de voltajes o corrientes inducidas a partir de magnetismo por aplicación o creación de esfuerzos mecánicos (**efecto Villari**), campos magnéticos intensos (**efecto Wiegand**), variaciones de flujo magnético (**efecto Faraday**), campos magnéticos ortogonales (**efecto Hall**), calor (**efecto Ettingshausen**), etc. **Ejemplos**: sensores magnetoelásticos, sensores de efecto Wiegand, tacogeneradores, sensores de velocidad lineal (LVS), caudalímetros electromagnéticos, sensores de efecto Hall, codificadores magnéticos, magnetodiodos, etc. **Figura 3.10.**

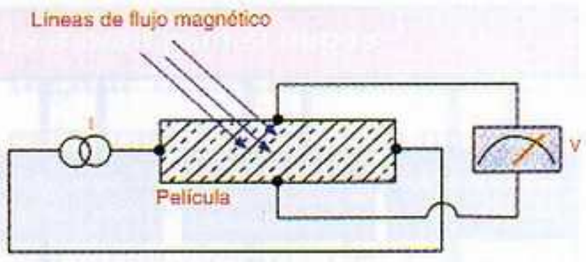


*Figura 3.10. Principio de funcionamiento de un sensor de efecto Hall. Al impulsar una corriente **I** en la dirección longitudinal de la película metálica, sumergida en un campo magnético, aparece entre sus extremos superior e inferior un voltaje **V**, que es directamente proporcional a la densidad de las líneas de flujo magnético.*

- **Efectos piezoeléctrico y piezoresistivos**. Producción de voltajes o corrientes a partir de esfuerzos mecánicos directamente (e. piezoeléctrico) o por variación de la resistencia (e. piezorresistivo). **Ejemplos**: sensores piezoeléctricos y piezorresistivos de fuerza, torque o par, presión, aceleración, vibración, temperatura, etc. **Figura 3.11.**

- **Efectos térmicos y termoeléctricos**. Producción de voltajes o corrientes a partir de temperatura, directamente o indirectamente por variación de la resistencia, la aplicación de radiaciones térmicas, etc.

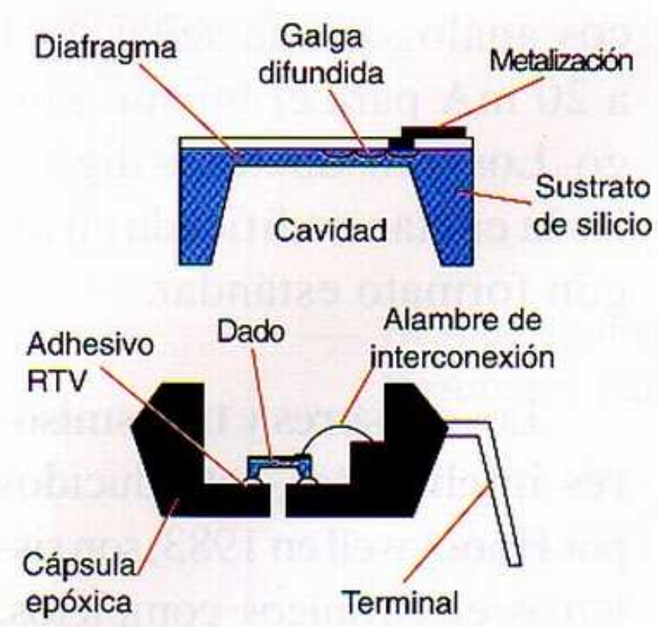


Figura 3.11. Estructura de un sensor de presión piezorresistivo micromecanizado. El diafragma se deflecta de acuerdo a la presión aplicada por el fluido a la cavidad, produciéndose una señal de salida proporcional a la misma.

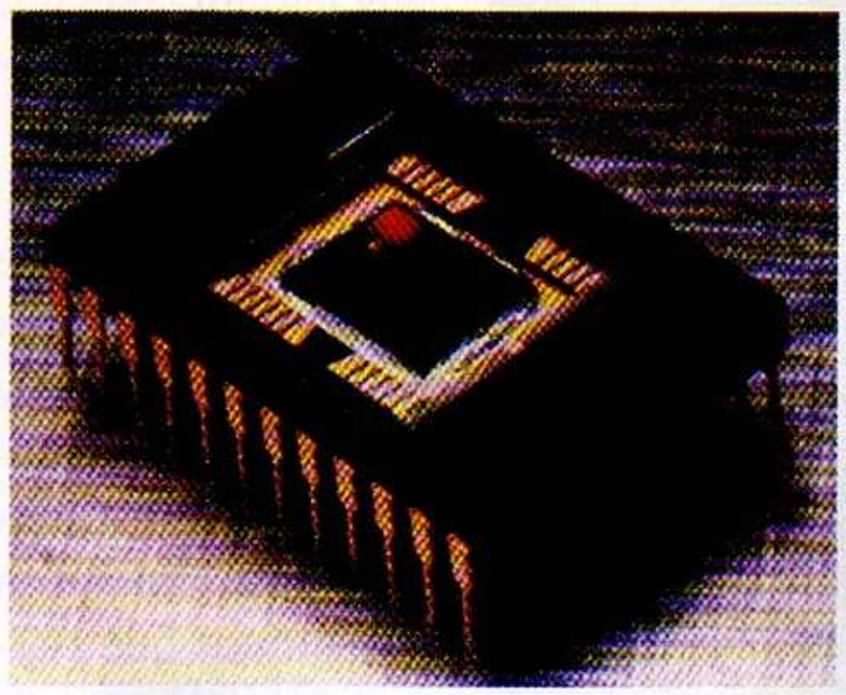


Figura 3.13. Sensor de imagen de alta resolución basado en CCDs o dispositivos de cargas acopladas. El mismo acumula imágenes en forma de cargas eléctricas en un arreglo bidimensional de celdas de memoria (pixels) y se lee electrónicamente como un registro de desplazamiento.

La producción directa de señales eléctricas a partir de variaciones de temperatura se conoce como **efecto Seebeck** y constituye el principio de funcionamiento de las termocuplas o termopares y de las termopilas, **figura 3.12**. Los métodos indirectos más comunes son el **efecto termorresistivo** (variación de la resistencia), en el cual se basan los termistores y las RTDs, y el **efecto piroeléctrico** (detección de radiaciones térmicas), en el cual se basan los pirómetros, los radiómetros, los analizadores de infrarrojos, y otros dispositivos. También es posible medir temperatura alterando las propiedades de uniones semiconductoras. En este método se basan los sensores de temperatura monolíticos, como el popular **LM35**.

- **Efectos ópticos y electroópticos**. Permiten la producción de señales eléctricas a partir de radiaciones luminosas directamente (e. fotovoltaico) o indirectamente por variación de la resistencia y otros parámetros eléctricos (e. fotoeléctricos). **Ejemplos:** detectores fotovoltaicos de luz, llama, color y humo, detectores fotoeléctricos de proximidad, fotodiodos, fototransistores, optoacopladores, codificadores ópticos, sensores de imagen CCD, sensores basados en fibras ópticas, etc. **Figura 3.13**

- **Efectos autorresonantes**. Permiten la producción de oscilaciones eléctricas a partir de fenómenos físicos resonantes como vibraciones mecánicas, ondas acústicas en cuerdas o cavidades, ondas superficiales en líquidos o sólidos, radiaciones nucleares, etc. **Ejemplos**: resonadores de cuarzo para la medición de temperatura, peso, fuerza y presión; galgas acústicas; sensores basados en cilindros vibrantes, sensores basados en dispositivos de ondas superficiales (SAW), caudalímetros de vórtices, sensores ultrasónicos para la medición de velocidad, caudal, nivel, proximidad, etc. **Figura 3.14**

- **Efectos químicos y electroquímicos**. Producen señales eléctricas en respuesta a cambios de concentración de sustancias o iones. **Ejem-**

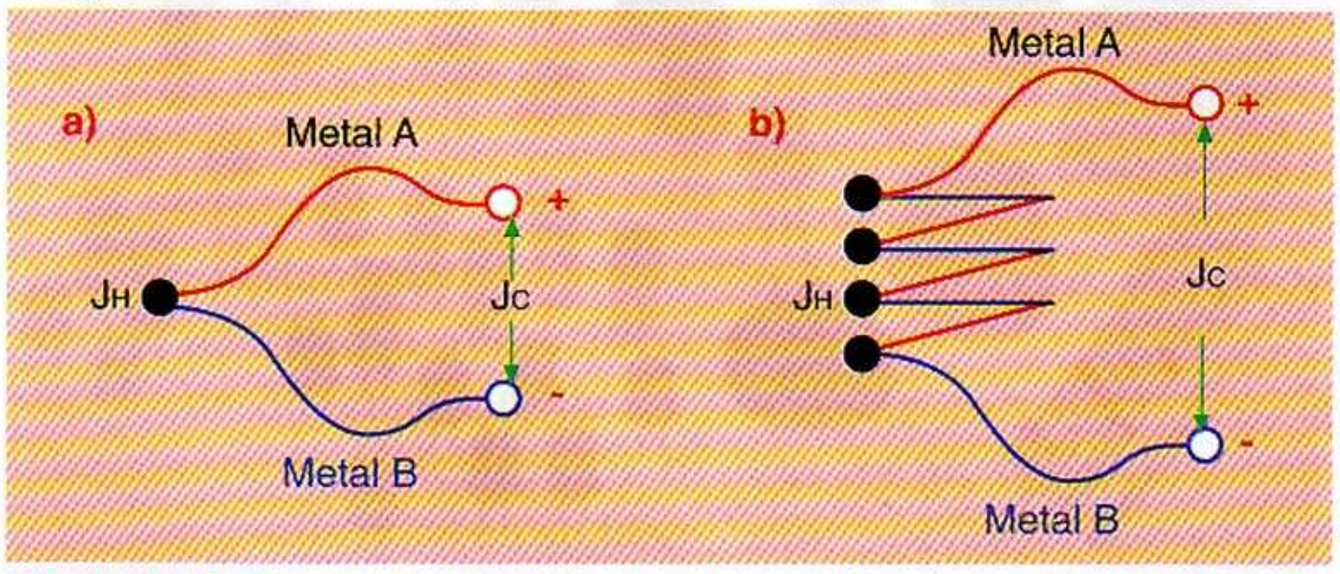


*Figura 3.12. Principio de funcionamiento de **(a)** una termocupla y **(b)** una termopila. Esta última está hecha de una serie de uniones de termocupla ennegrecidas que se calientan a medida que absorben radiaciones infrarrojas. JH=Unión caliente. JC=Uniones frías*

Figura 3.14. Sensor autorresonante ultrasónico. Este modelo, fabricado por ***Electro Corporation*** *(www.electrocorp.com) y diseñado específicamente para monitorear posición y verificar niveles en ambientes extremos, detecta una gran variedad de materiales a distancias hasta de 72 pulgadas (1.8 metros).*

plos: pilas voltaicas, sensores de oxígeno y otros gases, sensores químicos basados en MOSFETs (GASFETs, OGFETs, ADFETs, ISFETs), biosensores, etc. **Figura 3.15.**

Actualmente se dispone también de sensores **multifuncionales**, hechos de polímeros semiconductivos especiales, en los cuales se presenta un efecto determinado, digamos una variación de la resistencia, para diferentes tipos de variables. Por tanto, un mismo sensor multifuncional puede ser utilizado para medir humedad, presión, temperatura, etc., entregando para cada una el mismo tipo de curva de respuesta de salida, **figura 3.16**. Son realmente varios sensores en uno, con pines de acceso para cada variable y la posibilidad de incluir sensores adicionales.

Otros tipos de sensores especiales son los transmisores y los sensores inteligentes. Los **transmisores**, en particular, son dispositivos que captan la variable a medir a través de un transductor primario y la transmiten a distancia hacia un dispositivo receptor, digamos el controlador de un proceso, en forma de una señal neumática, electrónica o hidráulica equivalente, **figura 3.17**.

Típicamente, los transmisores neumáticos generan una señal estándar de **3 a 15 psi** (libras por pulgada cuadrada) para el rango de 0 al 100% de la variable medida, y los sensores electrónicos análogos una señal de 4 a 20 mA para el mismo rango. Los transductores digitales la envían codificada en algún formato estándar.

Los **sensores y transmisores inteligentes**, introducidos por **Honeywell** en 1983, son sistemas electrónicos completos, basados generalmente en microprocesadores, los cuales, además de su función básica de convertir una variable física en una señal eléctrica equivalente, traen incorporadas funciones adicionales de procesamiento y comunicación como autocalibración, cambio automático del rango de medida, autodiagnóstico, compensación ambiental, autocaracterización, interfaces seriales, etc. Son más precisos, estables y confiables que los sensores convencionales, y tienen rangos de medida más amplios. Además, no requieren mantenimiento y simplifican el diseño de sistemas de control. **Figura 3.18.**

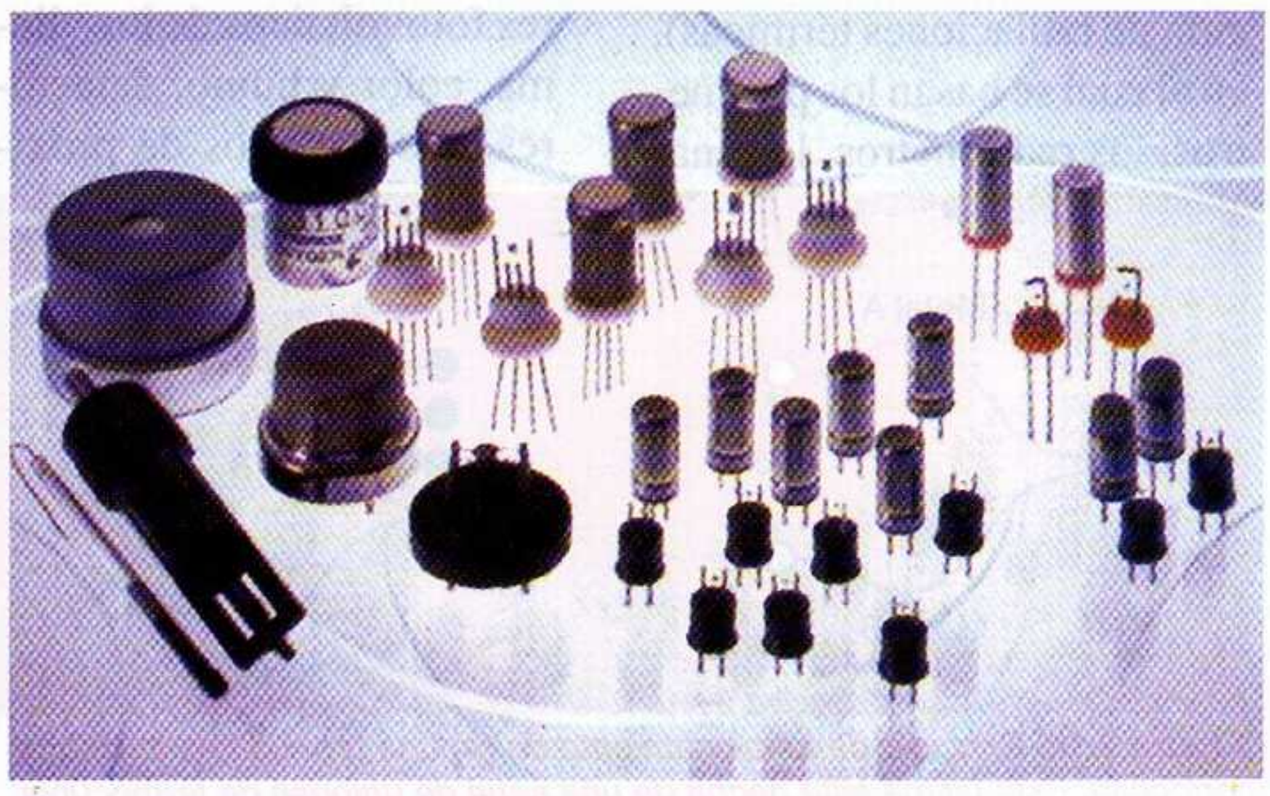


Figura 3.15. Sensores de gases, en distintas presentaciones y para diversas aplicaciones, basados en fenómenos electroquímicos.

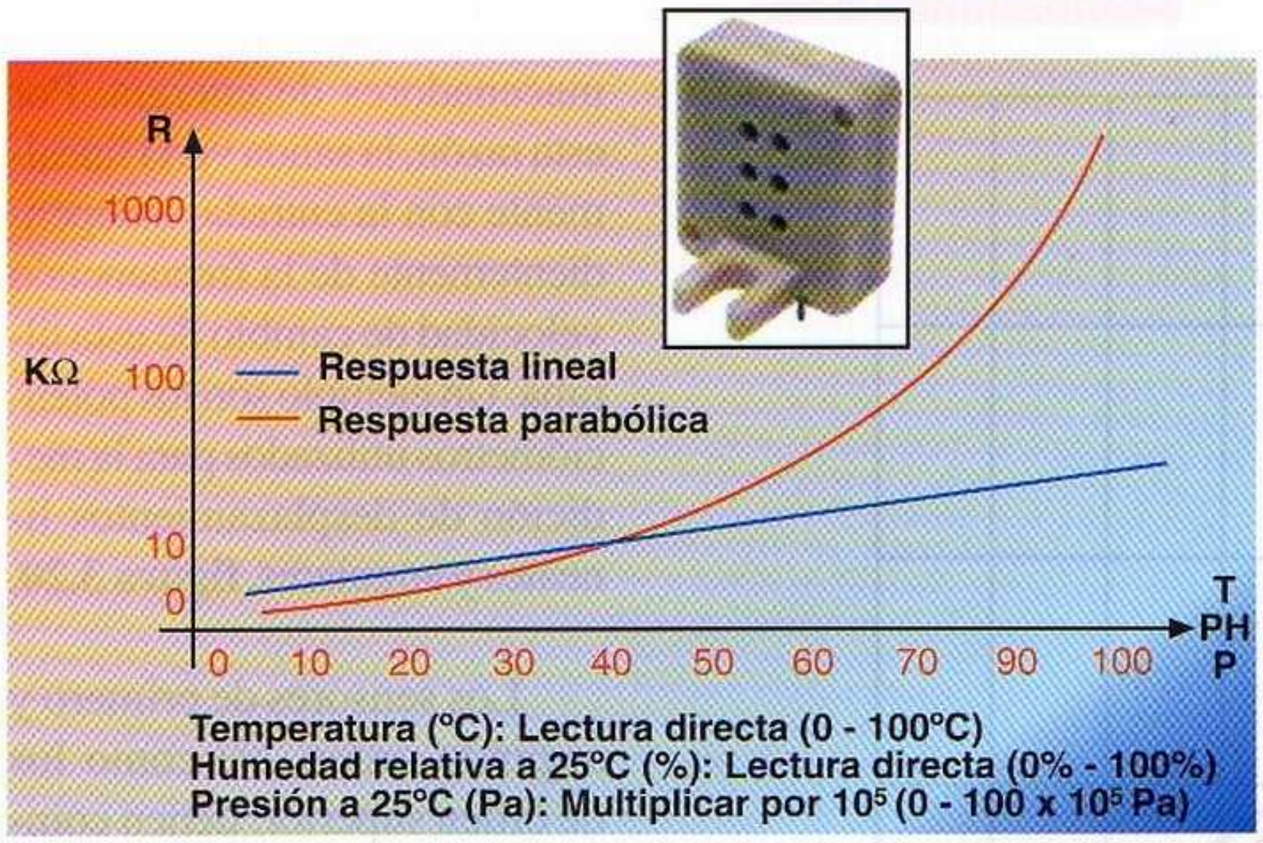


*Figura 3.16 Aspecto físico y curvas típicas de respuesta de un sensor resistivo multifuncional de **IRDAM** (www.irdam.com). El mismo puede medir presiones desde 1000 hasta 9000 kPa, humedades relativas desde el 0% hasta el 100% y temperaturas desde 0 hasta 90 °C.*

*Figura 3.17 Transmisor de punto de rocío (dew point). Este dispositivo, identificado con la referencia CMX 1 de **Panametrics** (www.panametrics.com) y basado en técnicas analógicas y digitales, mide la temperatura límite de condensación del vapor de agua existente en el aire o en un gas y la envía como una señal eléctrica equivalente sobre un loop de dos hilos de 4 a 20 mA.*

Características estáticas y dinámicas

El comportamiento de un sistema de control automático depende directamente de las características del sensor o sensores utilizados en su lazo de realimentación. Idealmente, un sensor debería entregar una señal de salida proporcional a la variable de entrada dentro de un amplio rango de validez, responder instantáneamente a los cambios de la misma, ser inmune a las perturbaciones externas, etc. En la práctica, esto no siempre sucede y la respuesta real de los sensores se ve frecuentemente afectada por alinealidades, retardos, ruido, etc. Por esta razón, las características técnicas de los sensores se expresan generalmente en forma de curvas o familias de curvas, **figura 3.19.**

Las curvas características de un sensor definen el comportamiento real del mismo con respecto al comportamiento ideal deseado o con el de un sensor tomando como patrón. Estas características se agrupan en dos grandes categorías: estáticas y dinámicas. Las **características estáticas** describen la actuación del sensor en régimen **permanente**, es decir sin cambios en la variable a medir o cambios muy lentos. Ejemplos de características estáticas son el campo de medida, la resolución, la exactitud, la precisión, la repetibilidad, la linealidad, la sensibilidad, el ruido y la histéresis.

Las **características dinámicas**, por su parte, describen la actuación del sensor en régimen **transitorio**, es decir ante cambios relativamente rápidos de la variable de entrada o cuando se le

*Figura 3.18 Transductor de presión inteligente. El dispositivo mostrado, de la serie PPT de la firma norteamericana **Honeywell** (www.ssec.honeywell.com) y capaz de medir presiones entre ±1 psi ±500psi, proporciona una salida análoga nominal de 0 a 5V y una interface serial RS-232 a través de la cual se pueden configurar el rango de medida y otros parámetros.*

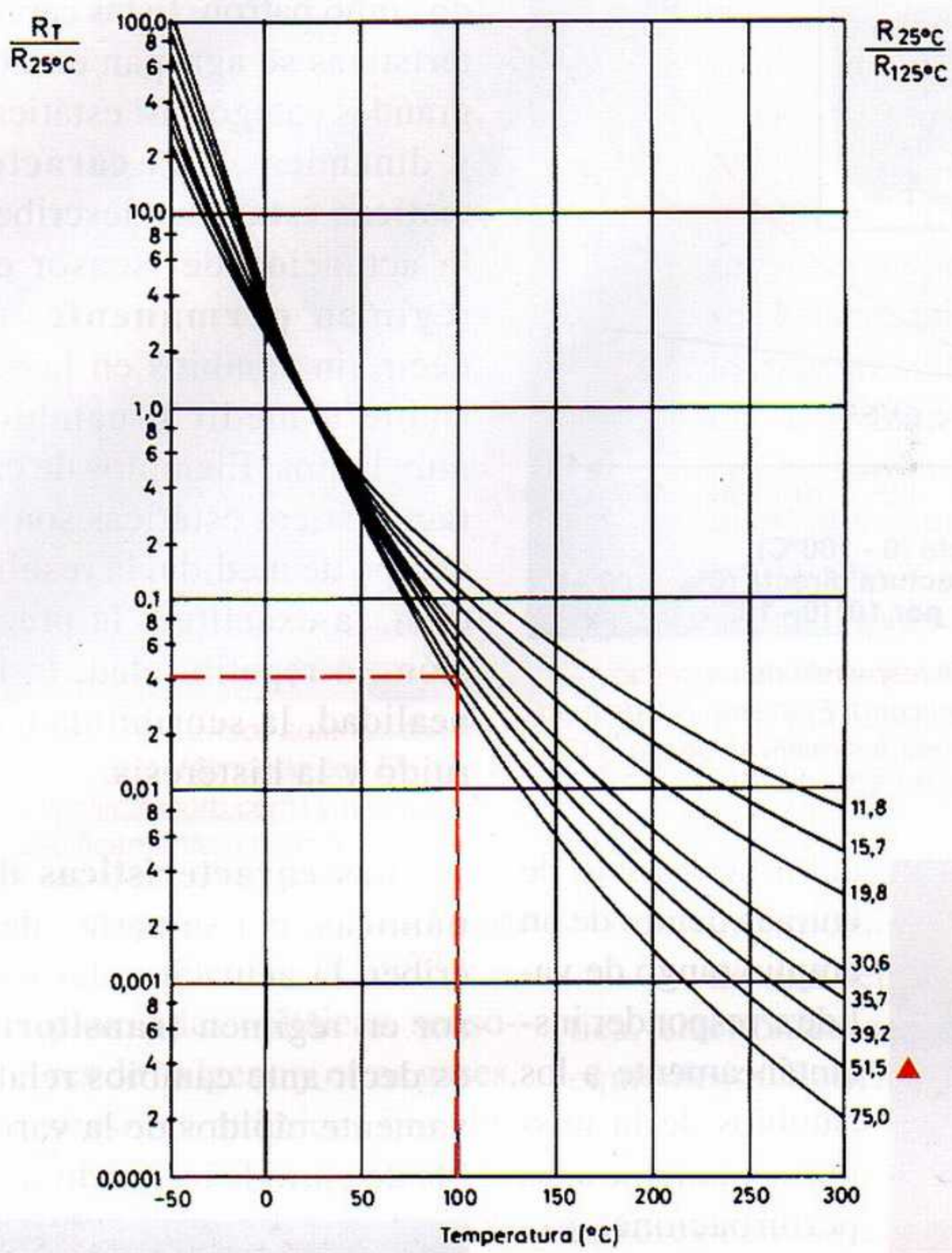


Figura 3.19 Familia típica de curvas características que muestran la forma como varía la resistencia de diversos termistores en función de la temperatura. R_{25} es la resistencia a 25°C (nominal), R_{125} la resistencia a 125°C y R_T a cualquier otra temperatura. Por ejemplo, si R_{25}=10kΩ, R_{25}/R_{125}=51.5 (dada al lado derecho) y R_T/R_{25}=0.04 a 100°C (medida sobre la gráfica), entonces la resistencia a 100°C (R_{100}) es 400Ω.

somete a determinados estímulos estándares (impulsos, escalones, rampas, senoides, ruido blanco, etc.). Bajo estas condiciones se manifiestan efectos de almacenamiento de energía que no aparecen cuando la magnitud a medir es constante. Ejemplos de características dinámicas son la velocidad de respuesta, la respuesta de frecuencia, la estabilidad y el error dinámico.

El comportamiento dinámico de un sensor puede ser descrito matemáticamente asumiendo que la entrada (X) y la salida (Y) se relacionan mediante una ecuación de transferencia de la forma Y(s)/X(s). Dependiendo del tipo de función obtenida, se habla de sensores de **orden cero**, de **primer orden**, de **segundo orden** y de **orden superior**. En un sensor de orden cero, en particular, no existen elementos almacenadores de energía. Por esta razón, la salida varía linealmente con la entrada, independientemente de la frecuencia o velocidad de cambio de esta última. Un ejemplo son los potenciómetros utilizados para la medición de desplazamientos lineales y angulares, **figura 3.20**.

Los sensores de primero y segundo orden, así como los de orden superior, tienen comportamientos más complejos. En un sensor de primer orden, por ejemplo, hay un elemento que almacena energía y otro que la disipa. Tal es el caso de un termómetro introducido en un recipiente con agua, donde las características termodinámicas de esta última (masa, calor específico, coeficiente de transmisión del calor, etc.), retardan la respuesta, aunque el proceso de transducción en sí es instantáneo. Todos estos aspectos los iremos examinando en detalle en los capítulos siguientes de esta misma sección. Ω

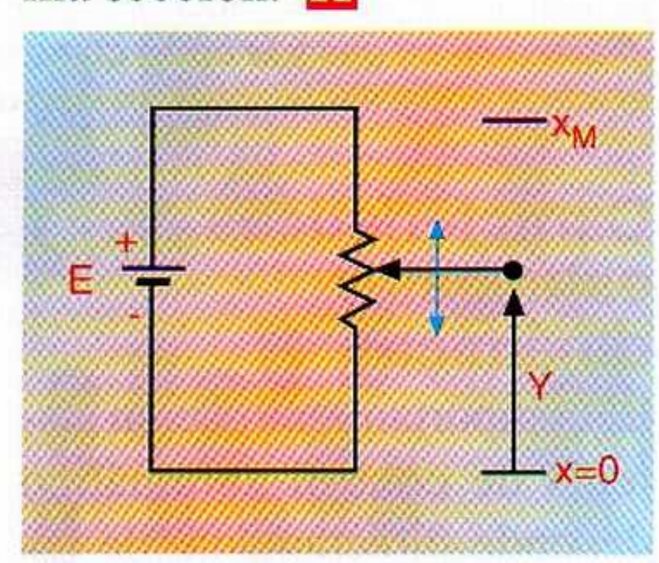


Figura 3.20 Un potenciómetro lineal utilizado como sensor de posición es un sensor de orden cero, porque el voltaje de salida (y) es proporcional al desplazamiento del cursor (x). X_M es el máximo desplazamiento medible.

Capítulo 4

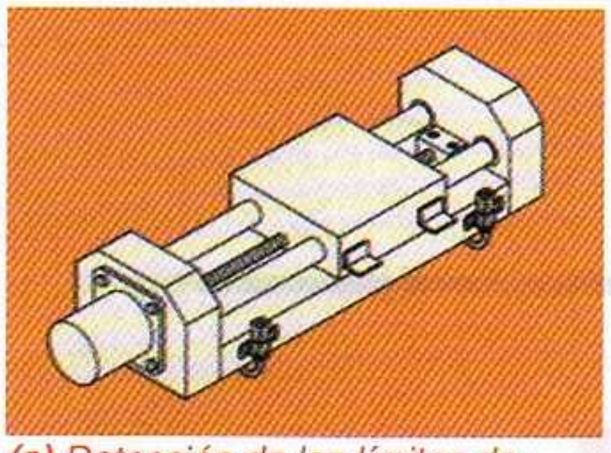
Detectores de proximidad

Muchos sistemas de control industrial sólo requieren para actuar de una señal binaria tipo "todo o nada" que les indique la presencia o ausencia de un objeto, material o característica por un punto de inspección. Es aquí donde entran en juego los modernos detectores de proximidad inductivos, capacitivos, fotoeléctricos y de otras tecnologías. En este capítulo se explica qué son, cómo se clasifican y cómo funcionan, y se examinan sus características y especificaciones más relevantes.

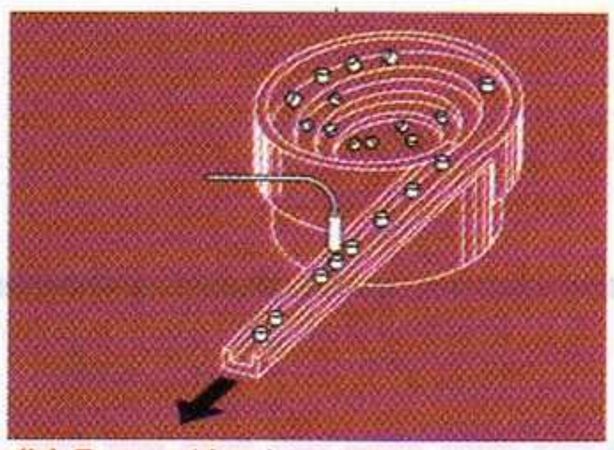
Generalidades

Los **detectores de proximidad** son sensores que detectan la presencia o ausencia de un objeto dentro de su área de influencia, sin entrar en contacto físico con él, y entregan como respuesta una señal binaria del tipo "todo o nada", equivalente a un contacto abierto o cerrado. Normalmente están basados en efectos inductivos, capacitivos u ópticos, aunque también existen sensores de proximidad ultrasónicos, magnéticos y electromecánicos, **figura 4.1.** Estos últimos, ejemplarizados en los **interruptores de límite** o de **final de carrera**, se exami-

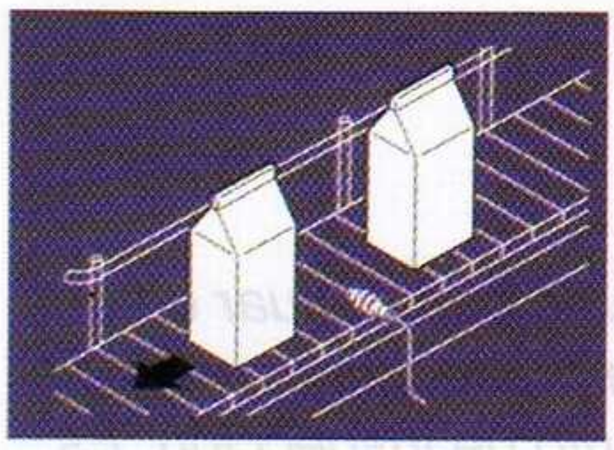
Figura 4.1 *Los sensores de proximidad son ampliamente utilizados en la industria moderna para el control de servomecanismos y de procesos. La fotografía ilustra el uso de un sensor fotoeléctrico de la serie PicoDot™ de* ***Banner*** *(www.baneng.com) para detectar flancos de obleas semiconductoras a distancias hasta de 115 mm.*



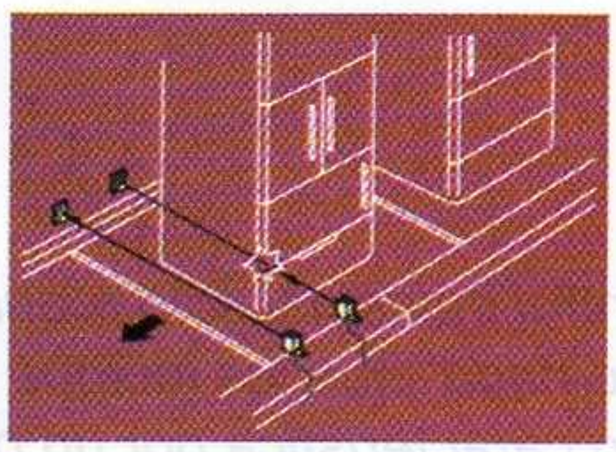
(a) Detección de los límites de recorrido de un mecanismo mediante sensores inductivos.



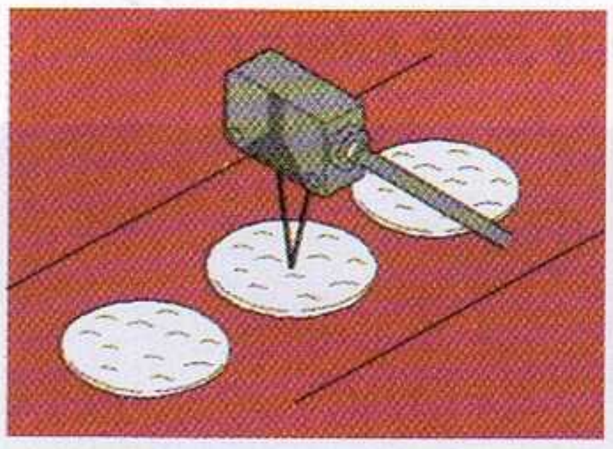
(b) Detección de componentes dentro de un alimentador de partes mediante sensores inductivos o capacitivos.



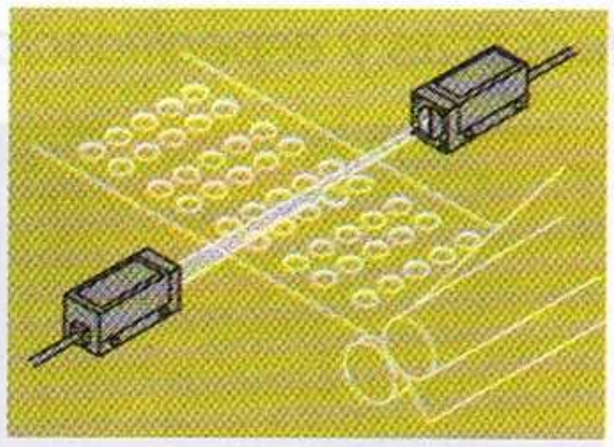
(c) Detección de cajas con leche sobre una banda transportadora mediante sensor capacitivo.



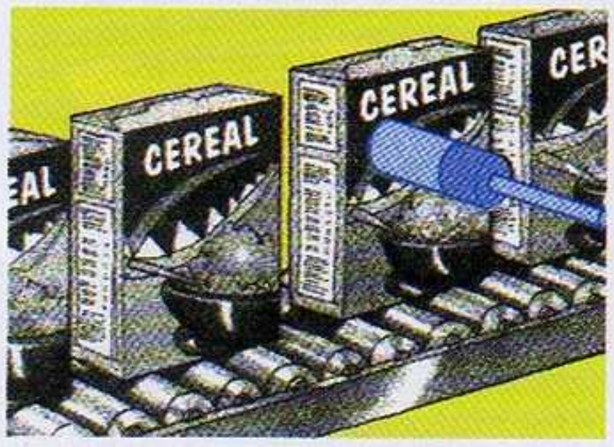
(d) Detección de marcas reflectivas en electrodomesticos mediante sensores fotoeléctricos.



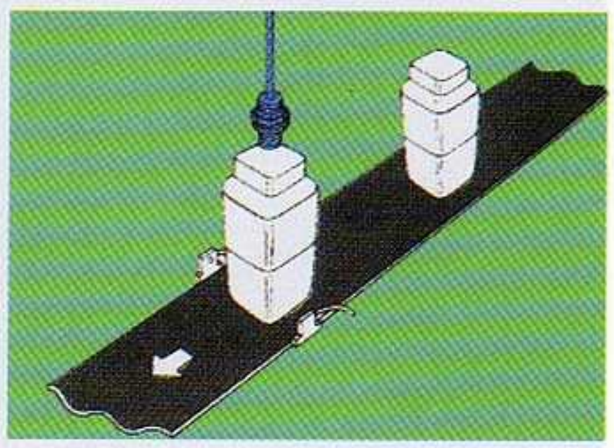
(e) Detección de galletas horneadas mediante un sensor fotoeléctrico.



(f) Detección de pastillas mal colocadas mediante un sensor láser.



(g) Detección de productos dentro de cajas selladas mediante sensor capacitivo.



(h) Detección de películas sellantes bajo tapas de productos mediante sensor inductivo.

Figura 4.2 Ejemplos de aplicación de los sensores de proximidad

nan en la sección de **Electricidad Industrial**. En este capítulo nos enfocaremos principalmente en los detectores inductivos, capacitivos y fotoeléctricos

Los detectores de proximidad electrónicos son ampliamente utilizados en servomecanismos y sistemas de control de procesos debido, entre otras razones, a que pueden operar a muy altas velocidades, no necesitan estar en contacto físico con los objetos que detectan, no tienen piezas móviles, no se desgastan, pueden trabajar en ambientes hostiles, tienen una larga vida útil, pueden detectar objetos muy frágiles y delicados, ofrecen salida por relé o por interruptor de estado sólido (SCR, triac, transistor), pueden conmutar directamente cargas AC o DC, son compatibles con PLCs, etc. En la **figura 4.2** se ilustran algunas aplicaciones típicas. Estas incluyen, por ejemplo:

- Verificar cuando una parte de una máquina ha alcanzado una cierta posición, **figura 4.2a.**
- Verificar la colocación apropiada de partes durante un procedimiento de ensamblaje en línea, **figura 4.2b.**
- Contar el número de productos que son transferidos a una banda transportadora, **figura 4.2c**

- Determinar la presencia, el tamaño, el color, el contenido, la alineación u otra característica particular de un producto que pasa por un punto de inspección, **figuras 4.2d- h.**
- Contar los dientes de un engranaje o medir las revoluciones de un eje para determinar la velocidad rotacional de una máquina o una parte de ella.

Tipos

Los detectores de proximidad electrónicos se clasifican normalmente de acuerdo al tipo de captador utilizado para realizar su acción básica de transducción. Desde este punto de vista, los detectores de proximidad más comunes son los **inductivos**, los **capacitivos**, los **ópticos**, los **ultrasónicos** y los **electromagnéticos**. Dentro de cada una de estas categorías, existen sus propias clasificaciones, siendo las más comunes las relacionadas con el tipo de alimentación (AC o DC), el tipo de salida (todo o nada, Namur o analógica) y el tipo de conexión (dos hilos, tres hilos, cuatro hilos o cinco hilos), **figura 4.3**.

Los **detectores de proximidad todo o nada**, **figuras 4.3a-f**, que son los más comunes, entregan una salida binaria (ON/OFF) y pueden ser AC o DC. Los primeros, como su nombre lo indica, conmutan cargas de AC y utilizan tiristores (SCRs o triacs) como interruptores de salida, mientras que los segundos conmutan cargas DC y utilizan transistores, generalmente bipolares (NPN, PNP), para el mismo propósito. El tipo de transistor de salida determina la forma como se conecta el sensor a la carga, digamos a la bobina de un relé o un contactor. En general, un detector AC no es apto para conmutar DC porque, una vez disparado, queda permanentemente enganchado.

Los **detectores Namur**, **figura 4.3g**, son un tipo particular de detectores inductivos todo o nada diseñados especialmente para trabajar en atmósferas explosivas. Dependiendo de la presencia o no del objeto detectado, entregan una salida alta o baja que se conecta a un amplificador externo remoto que maneja un relé. Los **detectores analógicos**, por su parte, **figura 4.3h**, entregan una corriente o voltaje proporcional a la separación entre el cabezal de detección y el objeto a detectar o **target**. Su principal aplicación es como sensores de distancia o posición, aunque su rango de medición es relativamente limitado.

Los **detectores de dos hilos**, **figuras 4.3** (**a**) y (**b**), pueden ser para AC o DC y se conectan en serie con la carga, actuando como interruptores NA o NC. Esta disposición no se aplica a los detectores

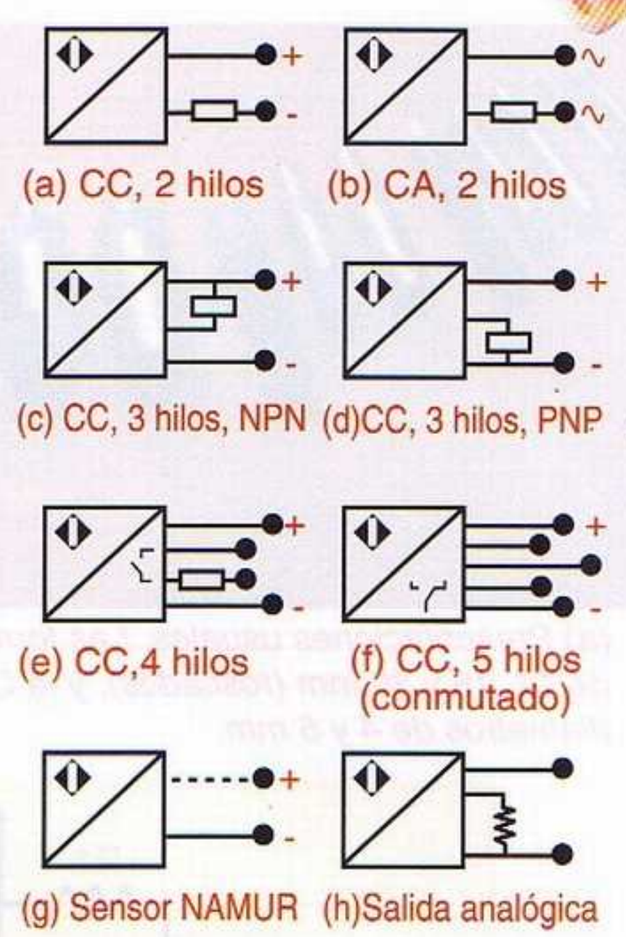
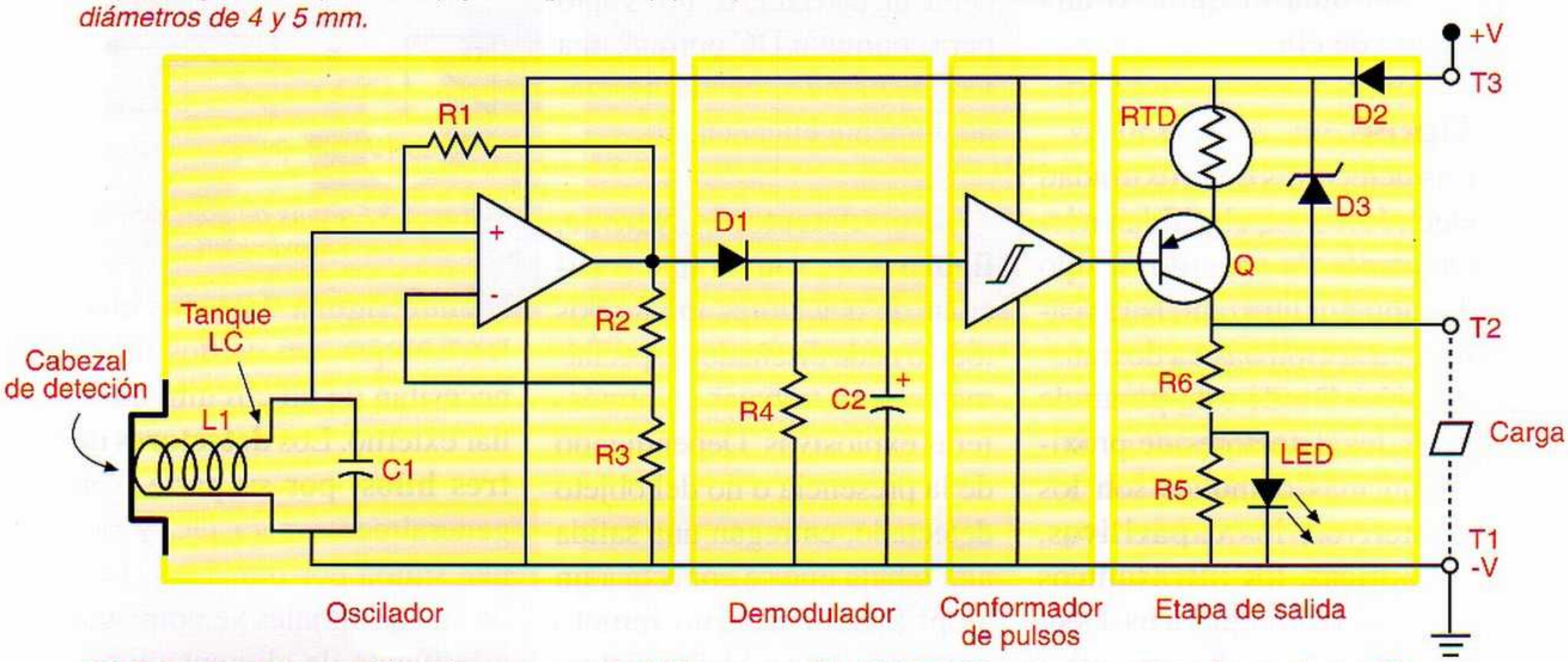


Figura 4.3 Formas de conexión de detectores de proximidad

Namur, **figura 4.3g**, los cuales, aunque son de dos hilos, necesitan de un circuito auxiliar externo. Los **detectores de tres hilos**, por su parte, son generalmente para DC y tienen salida por transistor. Dos de sus terminales se conectan a la fuente de alimentación y el otro a la carga. El terminal restante de esta última debe conectarse al positivo (+) de la fuente si la salida es NPN, **figura 4.3c**, o al negativo (-) de la misma si la salida es PNP, **figura 4.3d**. Lo mismo se aplica a los sensores analógicos, **figura 4.3h**.

Los detectores con salida NPN o PNP se denominan también, en su orden, sensores tipo **sumidero** (*sinking*) o tipo **fuente** (*sourcing*), debido a que los primeros drenan corriente de la fuente, mientras que los segundos la entregan a la car-

(a) Presentaciones usuales. Las formas más comunes son la A (cilíndrica roscada), con diámetros normalizados de 12, 18 y 30 mm (roscados), y la C (paralelepípedo). También existen formas cilíndricas no roscadas con diámetros de 4 y 5 mm.



(b) Estructura interna típica de un sensor de 3 hilos con salida PNP. RTD protege contra sobrecorriente, D3 contra sobrevoltaje y D2 contra inversión del voltaje de alimentación.

***Figura 4.4** Detectores de proximidad inductivos.*

ga. Puesto que ambos modelos son de colector abierto, para su conexión a circuitos lógicos requieren de una resistencia externa de *pull-up* o de *pull-down*, respectivamente.

Finalmente, los **detectores de cuatro o cinco hilos, figuras 4.3 e** y **f**, se alimentan con DC pero pueden conmutar cargas AC o DC. Dos de sus terminales se conectan a la fuente de alimentación, mientras que los dos o tres restantes controlan la carga, actuando como un interruptor spst (un polo, una posición) o spdt (un polo, dos posiciones) independiente.

Detectores de proximidad inductivos

Los detectores de proximidad **inductivos**, desarrollados en Alemania durante la Segunda Guerra Mundial, se utilizan para detectar la presencia de objetos metálicos. Constan de un cabezal de detección, un oscilador LC de alta frecuencia (1-100 MHz), un demodulador, un conformador de pulsos *Schmitt trigger* y una etapa de salida, **figura 4.4**. En condiciones normales, sin objetos metálicos en las vecindades del cabezal, el oscilador produce una señal sinusoidal de amplitud constante que es convertida por el demodulador en un nivel DC equivalente y por el conformador en un nivel alto o bajo. Como resultado, el transistor de salida permanece OFF y la carga se mantiene desenergizada.

El cabezal de detección es simplemente una bobina, incorporada al oscilador, que produce un campo magnético variable en sus vecindades. La misma está devanada alrededor de un núcleo de ferrita y puede estar o no blindada. En el primer caso, las líneas de flujo del campo están dirigidas hacia el frente del cabezal, mientras que en el segundo lo están tanto al frente como a los lados, **figura 4.5**.

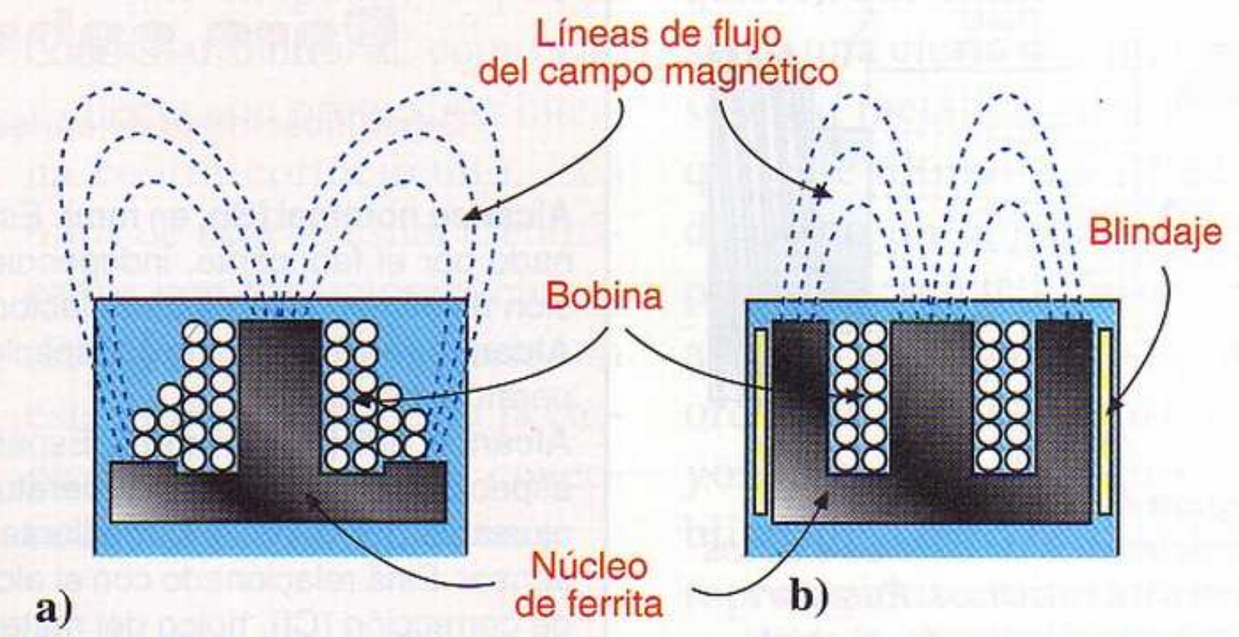


Figura 4.5. Configuración de las líneas de flujo para un sensor inductivo no blindado (a) y blindado (b). Los primeros responden a aproximaciones radiales y los segundos a aproximaciones axiales.

Por esta razón, para detectar aproximaciones **axiales** de objetos, es decir realizadas de frente al cabezal, deben usarse sensores blindados, mientras que para detectar aproximaciones **radiales**, es decir realizadas desde los lados, deben usarse sensores no blindados. Estos últimos tienen un mayor alcance.

Cuando se ubica un objeto metálico dentro del campo magnético del captador, en el primero se inducen unas corrientes parásitas, llamadas **corrientes de Foucault o remolino** (*eddy*), las cuales, al interactuar con el campo original, alteran la inductancia de la bobina, disminuyendo la señal del oscilador y, consecuentemente, el nivel DC del demodulador, **figura 4.6**.

Como resultado, el cocnformador de pulsos *Schmitt trigger* se dispara y su salida cambia de estado. Por tanto, el transistor de salida conduce y la carga, digamos un relé, se energiza. Al abandonar el objeto metálico el área de detección, el sistema retorna a sus condiciones normales. Los objetos no metálicos no provocan cambio alguno. Por ello, no son detectados.

Temperaturas de servicio	-25 ...+70° C
Humedad relativa máxima	85%
Tensión nominal (AC o DC)	20 ... 264 V
Capacidad de corriente (DC)	5 ... 200 mA
Capacidad de corriente (AC)	5 ... 300 mA
Voltaje residual (AC o DC)	≤ 5.5V
Corriente residual (AC o DC)	≤ 1.5 mA
Alcance nominal (Sn)	8 mm
Zona de operación (Su)	0 ... 5.8 mm

Tabla 4.1 Especificaciones del sensor inductivo AC/DC de 2 hilos XS1M18MA250 (Telemecanique).

(a) Objeto metálico en las vecindades.

(b)Formas de onda en puntos claves del sistema.

Figura 4.6 Operación de un sensor de proximidad inductivo

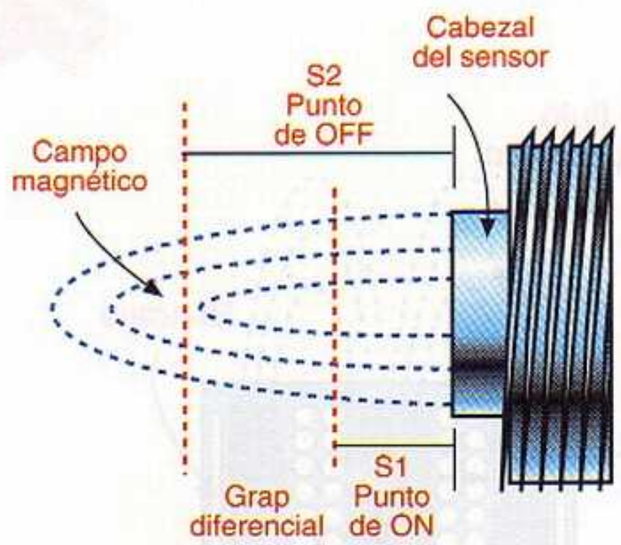


Figura 4.7 Ilustración de la característica de histéresis de los sensores inductivos. Para ser detectado o ignorado, el objeto tiene que salir del gap diferencial

Los detectores inductivos poseen una característica llamada **histéresis**, ilustrada en la **figura 4.7**. Para ser detectado, el objeto tiene que acercarse a una distancia inferior a S1 (punto de ON o de accionamiento), y para ser ignorado alejarse una distancia superior a S2 (punto de OFF o de desaccionamiento).

La distancia entre S1 y S2 se denomina **gap diferencial** y, en la mayoría de los casos, es ajustable por el usuario mediante un potenciómetro incorporado en el sensor. Mientras el objeto no salga de esta banda, la salida no cambia de estado. Así se evita que, debido a la vibración o el juego mecánico de una máquina, un objeto estacionario produzca una señalización múltiple o errónea.

Además de la histéresis, otras características importantes relacionadas con los detectores inductivos, aplicables también a detectores capacitivos, son la frecuencia de conmutación; los alcances nominal, real, útil y de trabajo; la reproductibilidad o fidelidad; los tiempos de retraso a la disponibilidad, el accionamiento y el desaccionamiento; la intensidad residual y el voltaje residual (ver recuadro "**Para saber más**"). Los valores de estos parámetros determinan, junto con el voltaje nominal, la capacidad

Para saber más

Especificaciones de sensores inductivos y capacitivos

Alcance nominal (Sn, en mm). Espacio de influencia convencional asignado por el fabricante, independientemente de la temperatura, la tensión de alimentación y otros factores. También llamado **sensibilidad**.
Alcance real (Sr, en mm). Espacio de influencia real a la tensión y temperatura nominales.
Alcance útil (Su, en mm). Espacio de influencia real en condiciones específicas de tensión, temperatura y otros factores. Normalmente es ajustable por el usuario mediante un potenciómetro incorporado en el sensor. Está relacionado con el alcance nominal (Sn) mediante un factor de corrección (Cf), típico del material a detectar. Esto es: Su = Sn x Cf. Por ejemplo, si Sn=10 mm y Cf=0.3, entonces Su=3 mm.
Alcance de trabajo (Sa, en mm). También llamado **zona de operación** o **dominio de operación**. Espacio de detección segura de un objeto tomado como patrón (target), independientemente de la temperatura y la tensión de alimentación. Normalmente se toma como target una placa cuadrada de acero dulce A37 de 1 mm de espesor y lado igual al diámetro de la cara sensible o tres veces el alcance nominal.
Corriente residual (Ir, en mA). Corriente que circula por el detector cuando no está sensando. Sólo aplicable a detectores de 2 hilos.
Histéresis (H, %). También llamada **carrera o gap diferencial**. Distancia entre el punto de accionamiento, cuando el objeto se acerca al detector, y el punto de desaccionamiento, cuando se aleja del mismo. Se expresa como un porcentaje del alcance real (Sr) o nominal (Sn).
Repetibilidad (R, en %). También llamada **fidelidad**. Precisión del alcance útil al repetir varias detecciones en intervalos de tiempo, temperatura y tensión especificados. Se expresa como un porcentaje del alcance real.
Frecuencia de conmutación (F, en Hz). Máxima rata a la cual puede ser detectado un objeto en función de la velocidad con que se mueve y sus dimensiones.
Retraso a la disponibilidad (**Rd**, en **ms**). Tiempo necesario para garantizar la utilización de la señal de salida del detector después de haber sido energizado.
Retraso al accionamiento (**Ra**, en **ms**). Tiempo que transcurre desde el instante en que el objeto entra en la zona activa de detección hasta que cambia la señal de salida. Este tiempo determina la velocidad máxima a la que puede moverse el objeto, en función de su tamaño, para poder ser detectado.
Retraso al desaccionamiento (Rr, en ms). Tiempo que transcurre desde el instante en que el objeto sale de la zona activa de detección hasta que cambia la señal de salida. Este tiempo determina la separación mínima que debe existir entre dos objetos para poder ser detectados individualmente.
Voltaje residual (**Er**, en **V**). Diferencia de potencial existente entre los bornes del detector cuando está sensando. Sólo aplicable a detectores de dos hilos.

de conmutación de corriente, las condiciones ambientales de temperatura y humedad, y los aspectos mecánicos (forma, dimensiones, montaje, etc.), su idoneidad para una aplicación determinada.

Generalmente, la **sensibilidad** o **alcance nominal** (**Sn**) de los detectores de proximidad inductivos se especifica tomando como patrón de medida una placa de acero cuadrada del tipo A37, de lado igual al diámetro de la cara sensible del sensor y de 1 mm de espesor. Cuando el objeto que se desea sensar no es de acero, la distancia a la cual se produce la conmutación de la señal de salida, llamada el **alcance útil** (**Su**), se ve afectada por un factor de corrección (Cf). Esto es: **Su = Cf** x **Sn**. Típicamente, Cf es el del orden de **0.9** para el cromo níquel, **0.5** para el bronce, y **0.4** para el aluminio y el cobre. Por tanto, si Sn=15 mm y Cf=0.5 (bronce), entonces Sn=0.5x15 = 7.5 mm.

Como ejemplo, en la **Tabla 4.1** se relacionan las principales especificaciones del sensor de proximidad inductivo **XS1M18MA250** (AC/DC, 2 hilos, 18 mm, 250mA, no blindado) de **Telemecanique** (www.telemecanique.com), utilizado en la primera práctica del **Capítulo 1** de la sección de **Actividades**.

Este dispositivo puede conmutar tanto AC como DC y cuenta con protección interna contra cortocircuito. Los hilos de acceso están identificados con los colores marrón (BN) y azul (BU). En serie con este último, se conecta la carga. El otro terminal se conecta directamente a la fuente.

Los sensores de proximidad inductivos, en general, pueden ser utilizados para detectar tanto metales magnéticos (hierro, acero templado, acero inoxidable, níquel, etc.) como no magnéticos (latón, cobre, aluminio, etc.), siendo más sensibles en el primer caso que en el segundo. Por esta razón, no pueden detectar materiales no metálicos como el plástico, el cristal, etc. De cualquier modo, su operación no se ve afectada por el color y las condiciones superficiales del objeto a ser detectado. La forma de montaje depende de si son o no blindados.

Los sensores blindados, en particular, están diseñados para ser enrasados, es decir, montados a ras sobre soportes metálicos, tienen generalmente forma cilíndrica o de interruptor de límite y su alcance útil máximo es típicamente del orden de 0.4" (10 mm).

Los sensores no blindados, por su parte, pueden tener forma cilíndrica, de bloque rectangular plano o de interruptor de límite, y requieren que el cabezal sobresalga una cierta distancia del soporte metálico para evitar que este último sea detectado como un objeto válido y produzca señales falsas. Su alcance útil máximo es del orden de 0.7" (18 mm), mayor que el de los sensores blindados, pero no están autoprotegidos como estos últimos contra impactos accidentales.

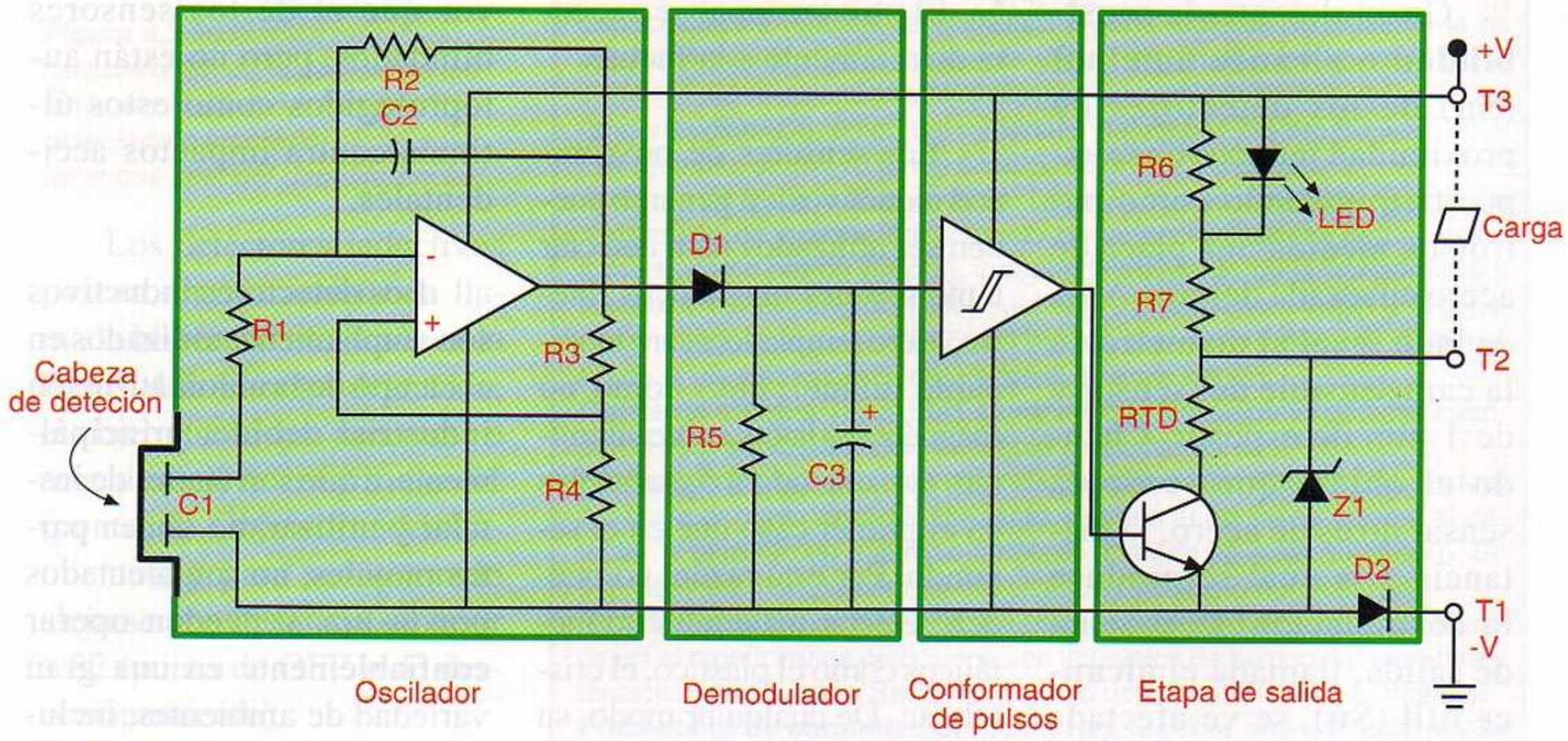
Los detectores inductivos son ampliamente utilizados en el campo de la automatización industrial debido, principalmente, a que son fáciles de instalar y utilizar, no tienen partes móviles, no son afectados por la luz, y pueden operar confiablemente en una gran variedad de ambientes, incluso con altas concentraciones de polvo, grasa, agua, ácidos, etc. Otros detalles prácticos relacionados con el uso de sensores de proximidad inductivos se examinan en la sección de **Electricidad Industrial** y en el **Capítulo 1** de la sección de **Actividades**.

Detectores capacitivos

Los detectores de proximidad capacitivos se utilizan para detectar tanto objetos metálicos como no metálicos. Son muy similares a los sensores inductivos, excepto por la estructura del oscilador, **figura 4.8**. Este último utiliza como cabezal de detección un con-

(a) Aspecto externo.

*Figura 4.8. Sensores capacitivos. El modelo mostrado en (a), de la serie quadronorm de **Efector, Inc** (www.efector.com) , es de dos hilos e incluye un LED ámbar que indica si el dispositivo está instalado incorrectamente, así como dos LEDs rojos que informan el estado de la salida. Su alcance es del orden de 50 mm.*



(b) Estructura interna típica de un sensor capacitivo DC de tres hilos con salida NPN

densador, formado por dos aros metálicos concéntricos y cuyo dieléctrico es el material de la zona sensible. Este último altera el campo eléctrico entre las placas, variando así la capacitancia y, por tanto, la frecuencia del oscilador.

Cuando un objeto no metálico entra al campo eléctrico del cabezal de detección, el campo eléctrico entre las placas se intensifica debido a que la constante dieléctrica del objeto es mayor que la del aire. Por tanto, la capacitancia aumenta, **figura 4.9(a).** En el caso de un objeto metálico, este último debilita el campo eléctrico entre las placas, actuando como un tercer electrodo y formando dos condensadores en serie, **figura 4.9(b).** Como resultado, la capacitancia disminuye. En ambos casos, el efecto neto es la variación de la frecuencia del oscilador. Este cambio es detectado por el demodulador y convertido por el conformador en un nivel alto o bajo adecuado para disparar el transistor de salida y energizar la carga.

Los detectores capacitivos también poseen histéresis y se especifican mediante los mismos parámetros utilizados para caracterizar los detectores inductivos. Sin embargo, su sensiblidad depende marcadamente del tipo de material a detectar, específicamente de su constante dieléctrica (κ), siendo mayor para conductores que para aislantes.

La sensibilidad es igualmente afectada por la temperatura y la humedad ambientales. Por estas razones, deben reajustarse para cada material y situación particular. Su alcance útil (Su) se determina multiplicando el alcance nominal (Sn) por un factor de corrección (Cf), propio de cada material.

Esto es:

Su = Sn x Cf

Como ejemplo, en la **Tabla 4.2** se relacionan las principales especificaciones del detector capacitivo **XT4P18PA372** (DC, 3 hilos, PNP, 18 mm, 372mA) de **Telemecanique** (www.telemecanique.com), utilizado en la segunda práctica del **Capítulo 1** de la sección de **Actividades**. En la **Tabla 4.3** se indican los factores de corrección para algunos materiales comunes, aplicables en general a todos los detectores capacitivos de las series XT1-M, XT4-P, XT1-L y XT4-L de la misma compañía.

Por ejemplo, para la detección de cemento (Cf= 0.35), el alcance útil de este dispositivo es Su = SnxCf = 8x0.35, es decir desde 0 hasta 2.8 mm. Para agua y metales en general, Cf puede ser considerado igual a 1.0.

Tabla 4.2 Especificaciones de los sensores capacitivos XT4P18 (Telemecanique)

Temperaturas de servicio	-25 ...+70 C
Humedad relativa máxima	5%
Tensión nominal	12 ... 24 VDC
Capacidad de corriente	0 .. 300 mA
Voltaje residual	≤ 2V
Corriente residual	0
Alcance nominal (Sn)	8 mm
Zona de operación (Su)	0 ... 5.8 mm

Los detectores capacitivos tienen típicamente forma plana o cilíndrica y, al igual que los inductivos, vienen en diámetros normalizados de 8 mm (M8), 12 mm (M12), 18 mm (M18) y 30 mm (M30) para las versiones roscadas, y de 4, 5 y 32 mm para las no roscadas. Los mismos pueden ser blindados o no, en cuyo caso pueden ser o no montados a ras. En este último caso, es obligatoria la conexión a tierra del soporte metálico.

Aunque los detectores capacitivos pueden ser utilizados para detectar materiales metálicos como cobre, bronce y latón, entre otros, su principal campo de aplicación es la detección de objetos no metálicos, como los relacionados en la **Tabla 4.3** y otros (líquidos, granos, plásticos, etc.). Su alcance, en general, es mayor que el de los detectores inductivos del mismo tamaño, siendo en algunos modelos superior a los 50 mm. Además, pueden sensar a través de paredes. Otros aspectos prácticos relacionados con este tipo de sensores, se examinan en la sección de **Electricidad Industrial** y en el **Capítulo 1** de la sección de **Actividades**.

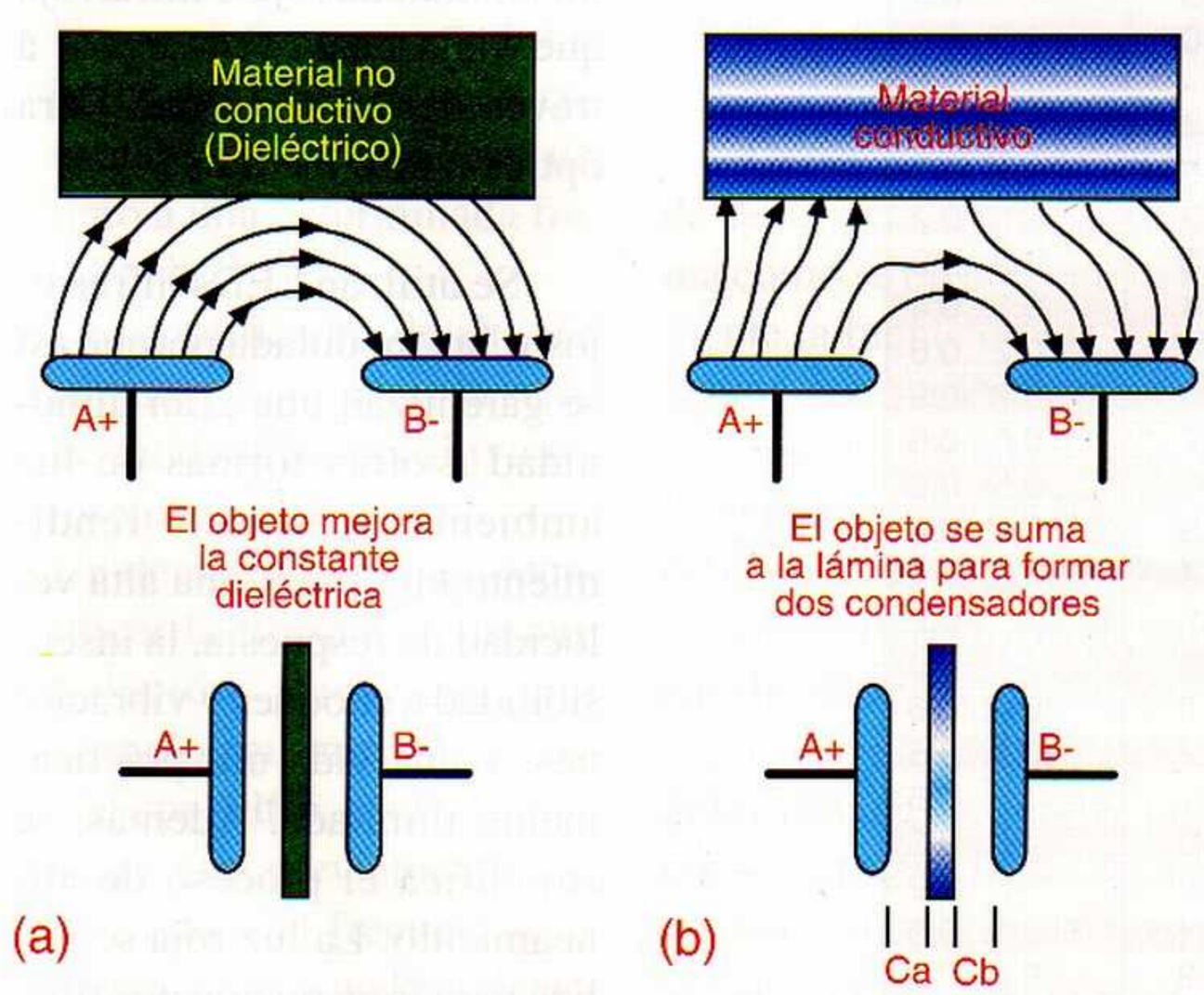


Figura 4.9 Comportamiento del campo eléctrico y la capacitancia entre las placas de un detector de proximidad capacitivo en presencia de objetos no metálicos (a) y metálicos (b).

Detectores de proximidad fotoeléctricos

Los detectores fotoeléctricos, **figura 4.10**, son dispositivos electrónicos que pueden abrir o cerrar un circuito eléctrico por la acción de un haz de luz y un elemento fotosensible. La detec-

*Figura 4.10. Los detectores fotoeléctricos han alcanzado un alto grado de sofisticación y son cada vez más importantes en la industria. En la fotografía se observa un sensor fotoeléctrico de marcas de color de la firma **Banner** (www.baneng.com) en acción en una rotativa detectando tintas. El dispositivo mostrado (**R55**) puede ser también utilizado para reconocer texturas y brillos, reconocer colores, mapear superficies, etc.*

Material	K	Fc
Aceite	2.2	0.2
Acetona	20	0.8
Agua	80	1
Aire	1	0
Alcohol	24	0.85
Arena	3...5	0.3...0.4
Amoníaco	15..25	0.75...0.85
Avena (15% de RH)	-	0.5%
Azúcar	3	0.3
Caucho	2.5...30	0.3...0.9
Cebada (15% de RH)	-	0.6
Cemento	4	0.35
Cereal	3...5	0.3...0.4
Gasolina	2.2	0.2
Harina	2.5...3	0.2...0.3
Leche en polvo	3.5...4	0.3...0.4
Madera seca	2...7	0.2...0.6
Madera húmeda	10...30	0.7...0.9
Mármol	6...7	0.5...0.6
Mica	6...7	0.5...0.6
Nylon	4...5	0.3...0.4
Papel	2...4	0.2...0.3
Parafina	2...2.5	0.2
Plexiglass	3.2	0.3
Poliéster	2.8...8	0.2...0.6
Porcelana	5...7	0.4...0.5
PVC	-	0.6
Sal	6	0.5
Teflón	2	0.2
Trigo (15% de RH)	-	0.8
Vaselina	2...3	0.2...0.3
Vidrio	3...10	0.3...0.7

Tabla 4.3 Factores de corrección de alcance para algunos materiales

ción ocurre cuando el haz de luz es interrumpido o reflejado por el objeto que está siendo sensado. Los primeros sensores fotoeléctricos, desarrollados en la década de 1950, utilizaban una lámpara incandescente como fuente de luz y una celda conductiva o fotocelda como elemento sensible. Actualmente se utilizan dispositivos de estado sólido para estas funciones, los cuales son más eficientes, no envejecen, no se calientan, soportan vibraciones, discriminan la luz ambiente, etc.

Un sensor fotoeléctrico moderno, en general, lo constituyen tres bloques fundamentales, **figura 4.11**: un emisor, un detector y una circuitería electrónica. El emisor, en particular, utiliza uno o varios LEDs para producir un haz de luz modulada roja o infrarroja que viaja hacia el receptor a través del espacio, una fibra óptica u otro medio.

Se utilizan LEDs infrarrojos y luz modulada porque así se garantizan una gran inmunidad a otras formas de luz ambientales, un alto rendimiento luminoso, una alta velocidad de respuesta, la insensibilidad a choques y vibraciones, y una vida útil prácticamente ilimitada. Además, se simplifica el proceso de alineamiento. La luz roja se utiliza para transmisión por fibra óptica plástica y en detectores reflex polarizados.

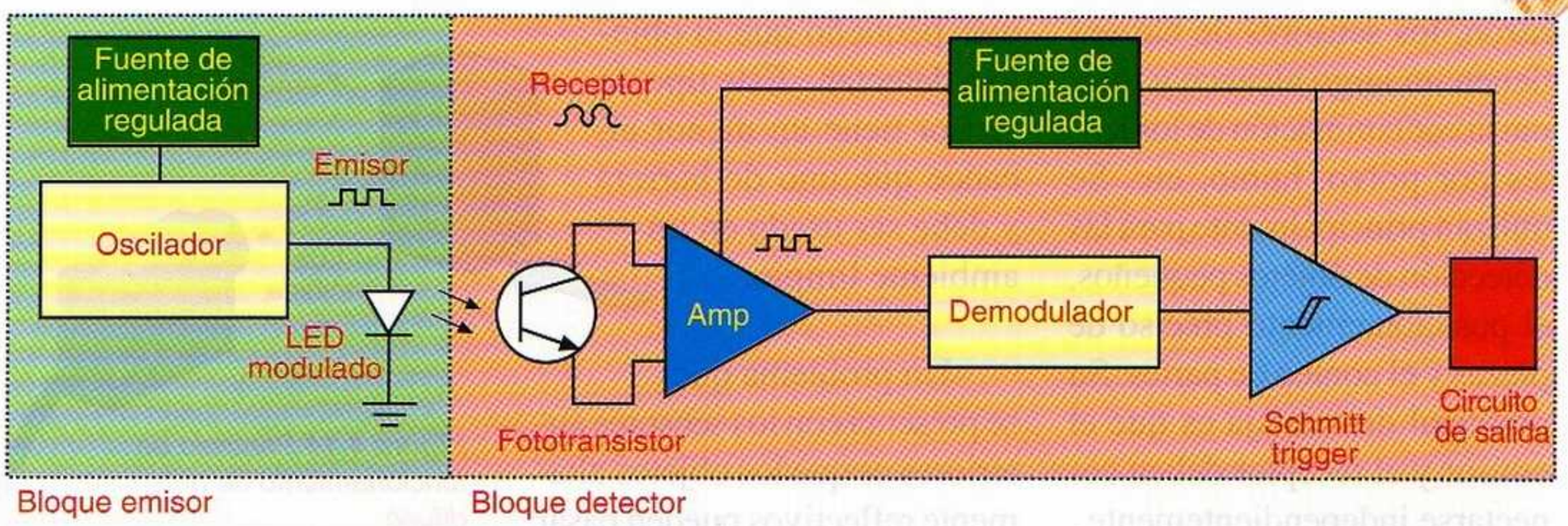


Figura 4.11 Diagrama de bloques de un sensor fotoeléctrico

El detector, por su parte, utiliza generalmente como elemento fotosensible un fotodiodo o un fototransistor, asociado a un sistema óptico, para detectar el haz de luz enviado por el LED del transmisor y producir una señal eléctrica equivalente de bajo nivel que indica la presencia o ausencia del objeto. La circuitería electrónica incluye, entre otros, los siguientes bloques funcionales:

- Un oscilador para **modular** la luz del LED, es decir conectar y desconectar este último a una determinada frecuencia.
- Un amplificador de alta ganancia para reforzar la señal de salida del dispositivo fotosensible.
- Un demodulador para identificar la frecuencia de modulación. Puede ser, por ejemplo, un simple rectificador con filtro si el amplificador está previamente sintonizado a la frecuencia de modulación, o un PLL detector de tonos en caso contrario. Algunos sensores fotoeléctricos, como los empleados para detectar objetos calientes que emiten su propia luz, no incluyen esta etapa puesto que el haz no viene modulado.
- Un conformador de pulsos *Schmitt trigger* para convertir la señal de salida del demodulador en una señal lógica, es decir un nivel alto o bajo.
- Una etapa de salida, con alta capacidad de corriente, para manejar la carga, digamos una bobina de contactor o relé.

Dependiendo del método de detección, es decir la forma como se posicionen físicamente la fuente de luz y el receptor, son posibles seis tipos de sensores fotoeléctricos: **de barrera**, **retrorreflectivos**, **difusos**, **convergentes**, **especulares** y **detectores de marcas de color**. El tipo de sensor a utilizar en una aplicación determinada depende, entre otros factores, de la distancia de detección, la intensidad de la señal óptica, las restricciones de montaje, las características del objeto a ser detectado, etc. Es importante, por ejemplo, saber si los objetos son opacos, translúcidos o claros, si son alta o ligeramente reflectivos, y si se sitúan siempre en la misma posición o lo hacen aleatoriamente a medida que pasan por el sensor.

En un sensor **de barrera, transmisivo** o de **exploración directa**, **figura 4.12**, el emisor y el receptor se posicionan opuestos entre sí, pero alineados, de modo que la luz del primero incide directamente sobre el segundo. La detección se realiza por **sombra** o **bloqueo**, es decir cuando el objeto interrumpe el haz de luz. Este método, adecuado para objetos no trasparentes, incluso reflectantes, es el que provee el más alto nivel de energía óptica. Por esta

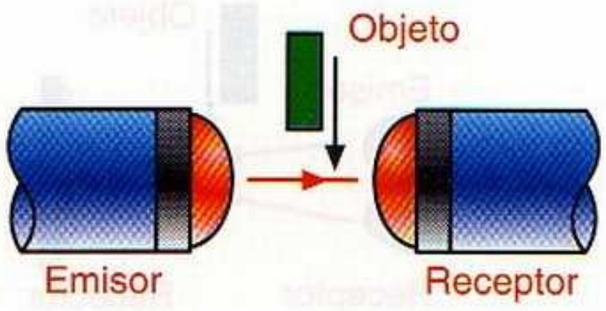


Figura 4.12 Principio de funcionamiento de un sensor fotoeléctrico de barrera o transmisivo

razón, los sensores de barrera tienen un largo alcance y toleran la contaminación de los lentes por polvo, humo, etc. Se utilizan principalmente para las detección de objetos pequeños, el posicionamiento preciso de piezas y el conteo de partes. Su principal desventaja es que el emisor y el receptor deben conectarse independientemente.

En un sensor **retrorreflectivo** o **reflex**, **figura 4.13**, el emisor y el receptor están montados uno adyacente al otro en la misma cápsula y la luz del primero se transmite por reflexión al segundo gracias a la acción de un elemento reflector externo. La detección se realiza por sombra o bloqueo.

El reflector está formado por un gran número de prismas o triedos que tienen la propiedad de reflejar todo rayo incidente en la misma dirección y en forma paralela. Para ello, debe ubicarse frente al detector, centrado y en un plano perpendicular al eje óptico del mismo. Su tamaño depende de la distancia con respecto al detector, pero debe ser más pequeño que el objeto a detectar. Este tipo de sensor tiene un menor alcance que uno de barrera y debe ser usado en un ambiente limpio.

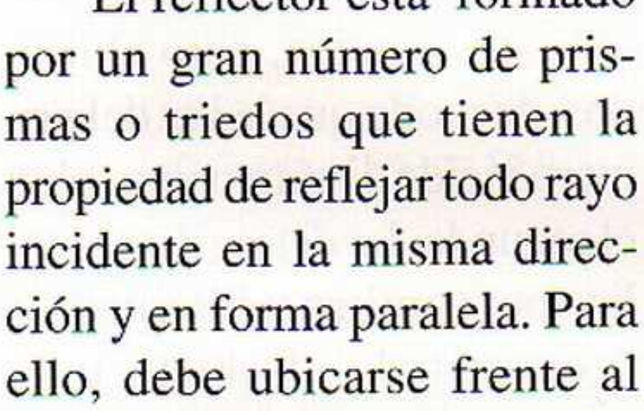


Figura 4.13 Principio de funcionamiento de un sensor retrorreflectivo o reflex

Un problema que se presenta con los sensores anteriores es que los objetos altamente reflectivos pueden pasar desapercibidos si los mismos retornan una cantidad de luz similar a la que entrega el reflector. Para solucionar este inconveniente, se utilizan varias técnicas, incluyendo el empleo de filtros de polarización en los lentes del emisor y el receptor que bloquean el paso de las ondas de luz en el plano de polarización vertical u horizontal.

Otro método es la utilización de un **retroreflector**, formado en su interior por miles de espejos prismáticos diminutos que procesan el haz de luz enviado por el transmisor y lo devuelven rotado 90° al receptor. También se puede controlar la reflexión posicionando el sensor con un cierto ángulo respecto a la superficie del objeto.

En un sensor **difuso** o **auto-reflex**, **figura 4.14**, el transmisor y el receptor están hospedados en la misma capsula. La posición del objeto se detecta cuando el mismo se coloca en línea con el haz del transmisor y la luz, al incidir, se dispersa, retornando una parte de ella al receptor. Por tanto, operan por **luz** o **reflejo.** Este método es el más conveniente desde el punto de vista de la instalación, puesto que la detección se realiza de un solo lado, sin necesidad de un reflector. Lo importante es que el objeto sea suficientemente reflectivo, tenga una gran área de dispersión y cualquier superficie de fondo del mismo no sea reflectiva o, si lo es, esté, por lo menos, a tres veces la distancia entre el detector y el objeto. Su alcance es corto y no se recomienda para objetos pequeños ni ambientes contaminados.

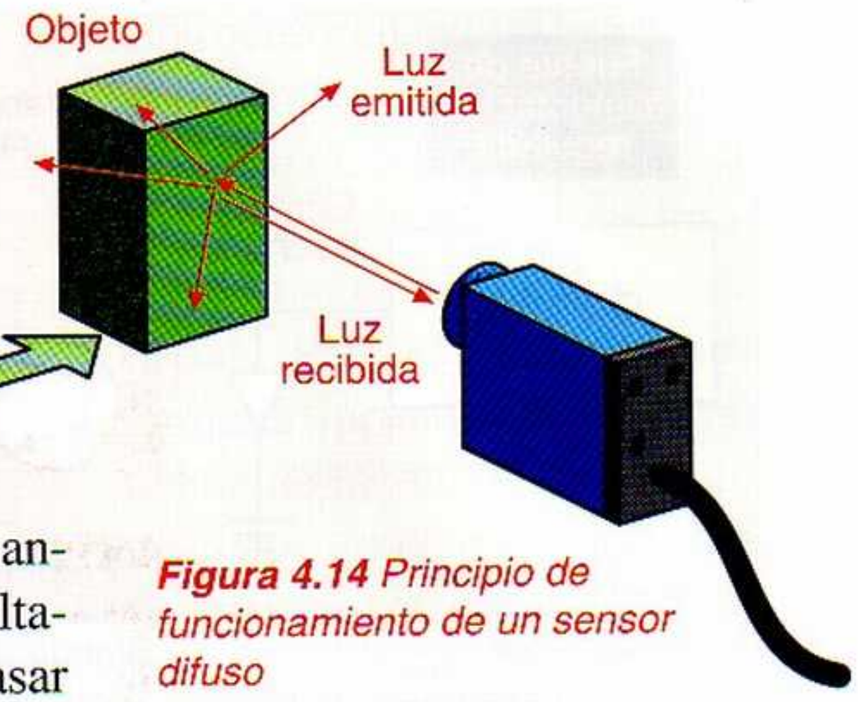


Figura 4.14 Principio de funcionamiento de un sensor difuso

En un sensor **convergente**, **figura 4.15**, la detección se realiza también por dispersión, pero el transmisor y el receptor están inclinados un mismo ángulo con respecto al eje vertical, y se utilizan lentes especiales para enfocar el haz en un área muy estrecha, llamada **profundidad de campo**. Los objetos por fuera de esta zona no son detectados.

Como resultado, la luz que llega al receptor es más potente que en el caso anterior, permitiendo que el sensor pueda detectar objetos muy pequeños o poco reflectivos. Este tipo de sensores puede ser utilizado, por ejemplo, para contar botellas, latas, etc., sobre bandas transportadoras cuando no hay espacio entre productos adyacentes, detectar diferencias de altura en partes móviles, inspeccionar piezas en su lugar en líneas de ensamble, detectar el nivel de llenado de materiales, etc.

En un sensor **especular**, **figura 4.16**, el transmisor y el receptor están colocados a ángulos iguales del objeto y la detección se realiza por reflexión total. Para ello, se requiere que las superficies del objeto sean como espejos y la distancia entre el mismo y el sensor permanezca constante. Este tipo de sensores se utilizan cuando se requiere diferenciar entre objetos brillantes y opacos. Un ejemplo común es la detección del alineamiento con respecto a una superficie reflectiva de un material difuso, digamos una tela sobre una mesa de acero en una máquina cosedora.

Finalmente, en un **sensor de marcas de color**, como el que aparece en la fotografía de la **figura 4.10**, en lugar de explorar el objeto a medida que pasa por el punto de inspección, se detecta por convergencia el contraste entre dos colores. Estos últimos pueden estar sobre la misma superficie o pertenecer a objetos separados. Este tipo de sensores son ampliamente utilizados en operaciones de empaque, donde se recurre a marcas de color para asegurar que la información que debe ir impresa sobre un producto aparezca siempre en el mismo lugar. Normalmente se utiliza como emisor una lámpara incandescente, que produce una luz blanca, o un LED de luz roja o verde. La luz blanca es la ideal, debido a que contiene todos los colores.

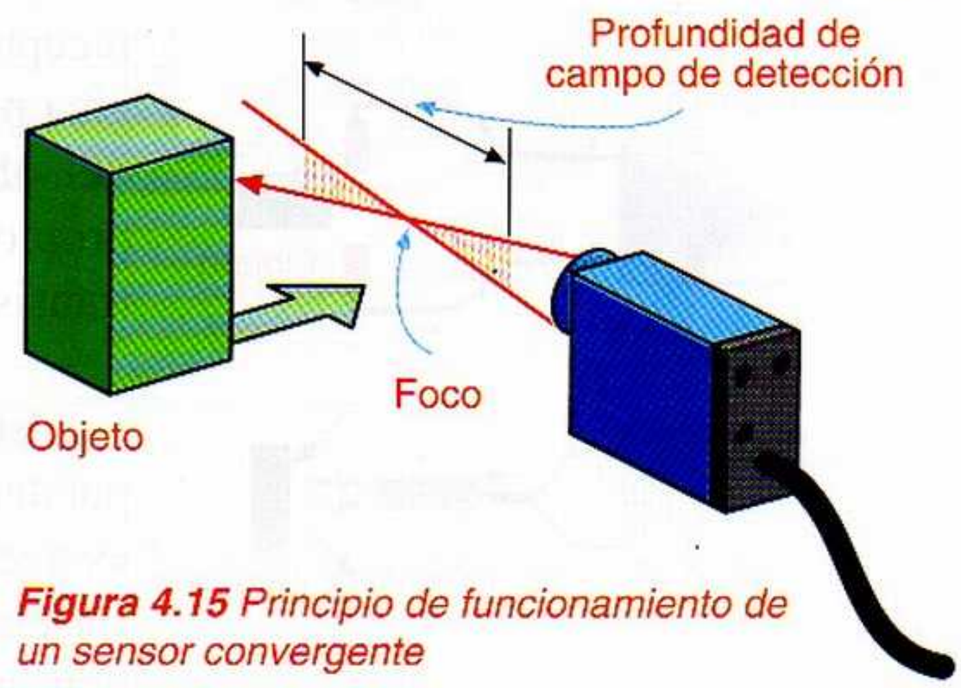


Figura 4.15 Principio de funcionamiento de un sensor convergente

Un caso particular de detectores fotoeléctricos, utilizados principalmente en espacios confinados o ambientes muy hostiles, son los **sensores de fibra óptica, figura 4.17**, donde, como su nombre lo indica, se utiliza un conductor de fibra óptica, plástico o de vidrio, para transferir la luz hacia y desde el punto de detección. En el caso mostrado en (**a**), la detección se realiza por barrera, mientras que en (**b**) se realiza por difusión. En ambas situaciones, tanto el emisor como el receptor están hospedados en la misma cápsula. La luz que sale del emisor viaja por la fibra superior e incide sobre el objeto a detectar, siendo interrumpida o dispersada por este último. La luz restante llega al receptor conducida por la fibra inferior.

También se dispone de **fotomicrosensores**, generalmente de tipo transmisitivo o reflectivo, caracterizados por su pequeño tamaño, **figura 4.18**. Los mismos utilizan un LED, rojo o infrarrojo, como fuente de luz y un fototransistor o un fotodiodo como receptor. En el caso de un sensor **transmisivo** o **ranurado**, el LED se monta opuesto al re-

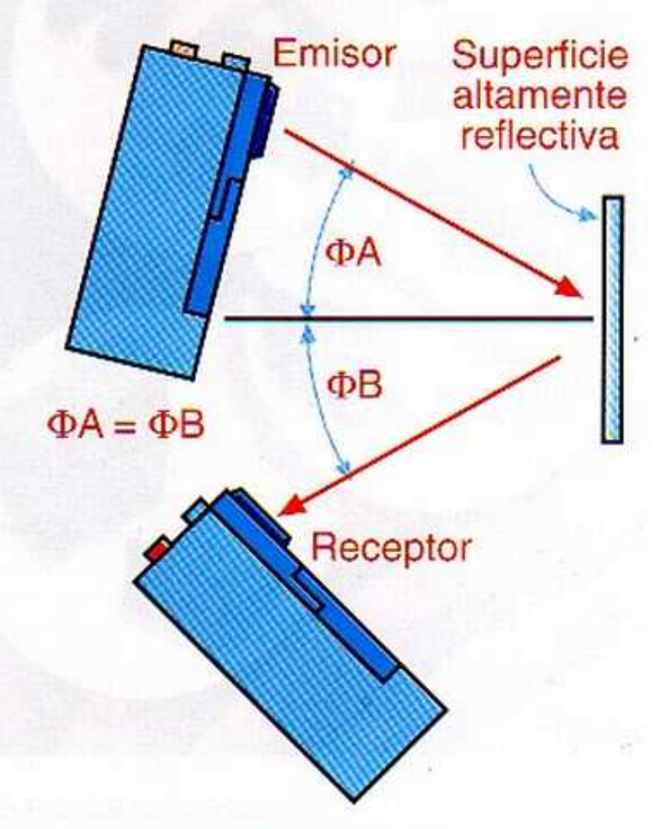


Figura 4.16 Principio de funcionamiento de un sensor especular o tipo espejo

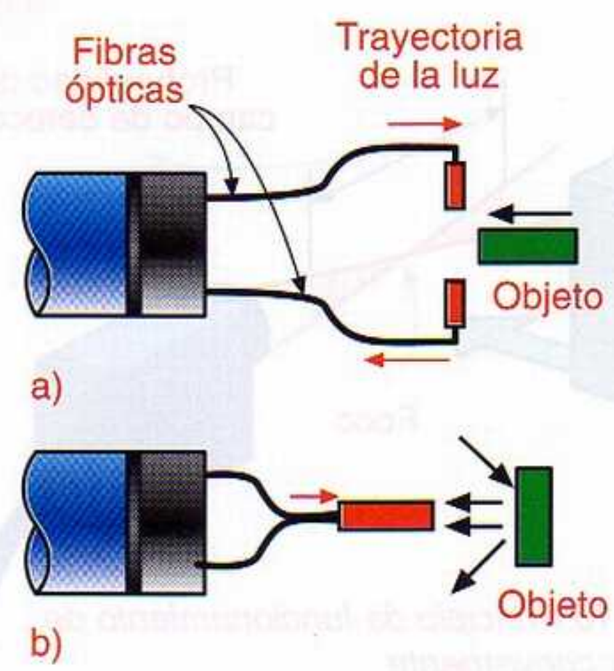


Figura 4.17 Principio de funcionamiento de un detector de fibra óptica operando por barrera (a) o por difusión reflectiva (b)

ceptor. La detección ocurre cuando el objeto pasa a través de la ranura e interrumpe el haz. En el caso de un sensor **reflectivo**, las superficies emisora y receptora están posicionadas angularmente, de modo que si un objeto interrumpe el haz, la luz se refleja hacia el receptor. En ambos casos, el receptor genera una señal lógica para indicar la presencia del objeto, proveniente del propio fototransistor o de un transistor de salida.

Los fotomicrosensores pueden ser o no **amplificados**, es decir traer o no la circuitería electrónica de amplificación incorporada. Los primeros utilizan como receptor un circuito integrado óptico (foto IC), formado por un fotodiodo, un amplificador, un conformador de pulsos y un transistor de salida, **figura 4.19a**. Los segundos utilizan como receptor y dispositivo de salida un fototransistor o un fotodarlington, y requieren de un cuidadoso diseño de la circuitería externa para evitar su destrucción. En la **figura 4.19b** se muestra como ejemplo un circuito práctico de aplicación utilizando un fotomicrosensor **EE-SX1018** de **Omron** operando a **5V** para impulsar una entrada TTL. Los detalles del diseño de este circuito se explican en el recuadro "**Para saber más**" de la página 44.

Los sensores fotoeléctricos, en general, se caracterizan mediante los mismos parámetros utilizados para especificar los sensores inductivos y capacitivos, excepto por la introducción de algunos términos nuevos (ver recuadro "**Para saber más**" de la página 43). Los detectores para CC, en particular, son de tres hilos y ofrecen normalmente frecuencias de conmutación superiores a la de los detectores para AC o AC/DC. Deben conectarse en serie con la bobina de un contactor o relé, excepto si se trata de un fotomicrosensor no amplificado.

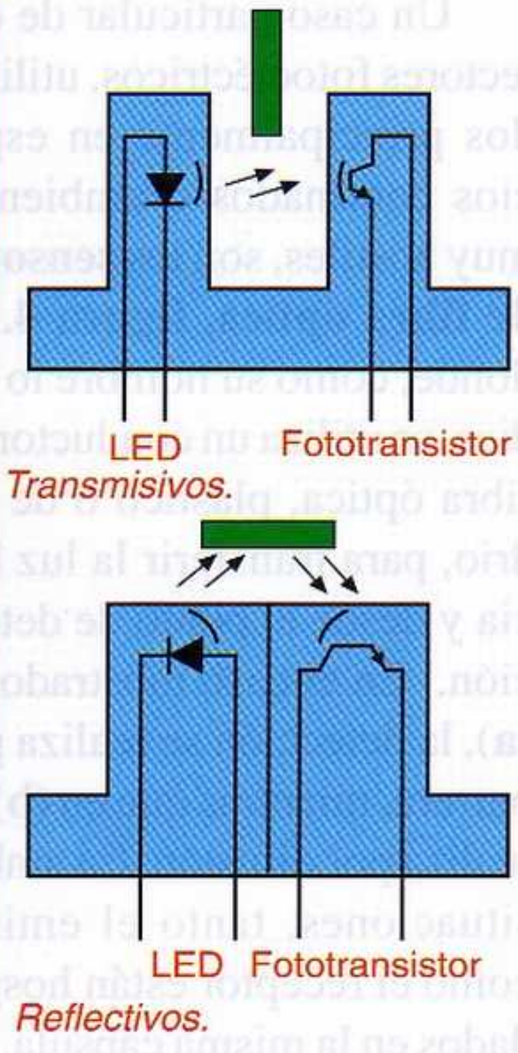


*Figura 4.18 Fotomicrosensores o sensores fotoeléctricos miniatura de tipo transmisivo y reflectivo. Los mostrados en la ilustración son fabricados por la firma **Omron** (www.omron.com). Se indica el principio de funcionamiento de cada tipo.*

En un sistema de barrera o transmisivo, solamente el receptor se conecta en serie con la bobina o el circuito de carga. Al igual que los sensores inductivos y capacitivos, se tienen dos tipos: PNP o de modo fuente y NPN o de modo sumidero.

Los detectores para AC o AC/DC, por su parte, pueden ser de 2 o 5 hilos. Los de 2 hilos deben conectarse en serie

con la bobina de un relé o contactor. En el caso de sensores de barrera, sólo se conecta el receptor. En los sistemas de 5 hilos, se usan 2 conductores para la fuente de alimentación y 3 para la señal de salida. Esta última la provee un relé interno, dotado de un contacto NA y uno NC, con un punto común. Otros aspectos prácticos importantes relacionados con los detectores fotoeléctricos se examinan en en el **Capítulo 1** de la sección de **Actividades Prácticas**, donde se experimenta con los sensores **XUDH-003537** (fibra óptica) y **XUBH-01353** (reflex), ambos de **Telemecanique** y suministrados por **G&L Ingenieros** (www.pymenet.com/gl). Ω

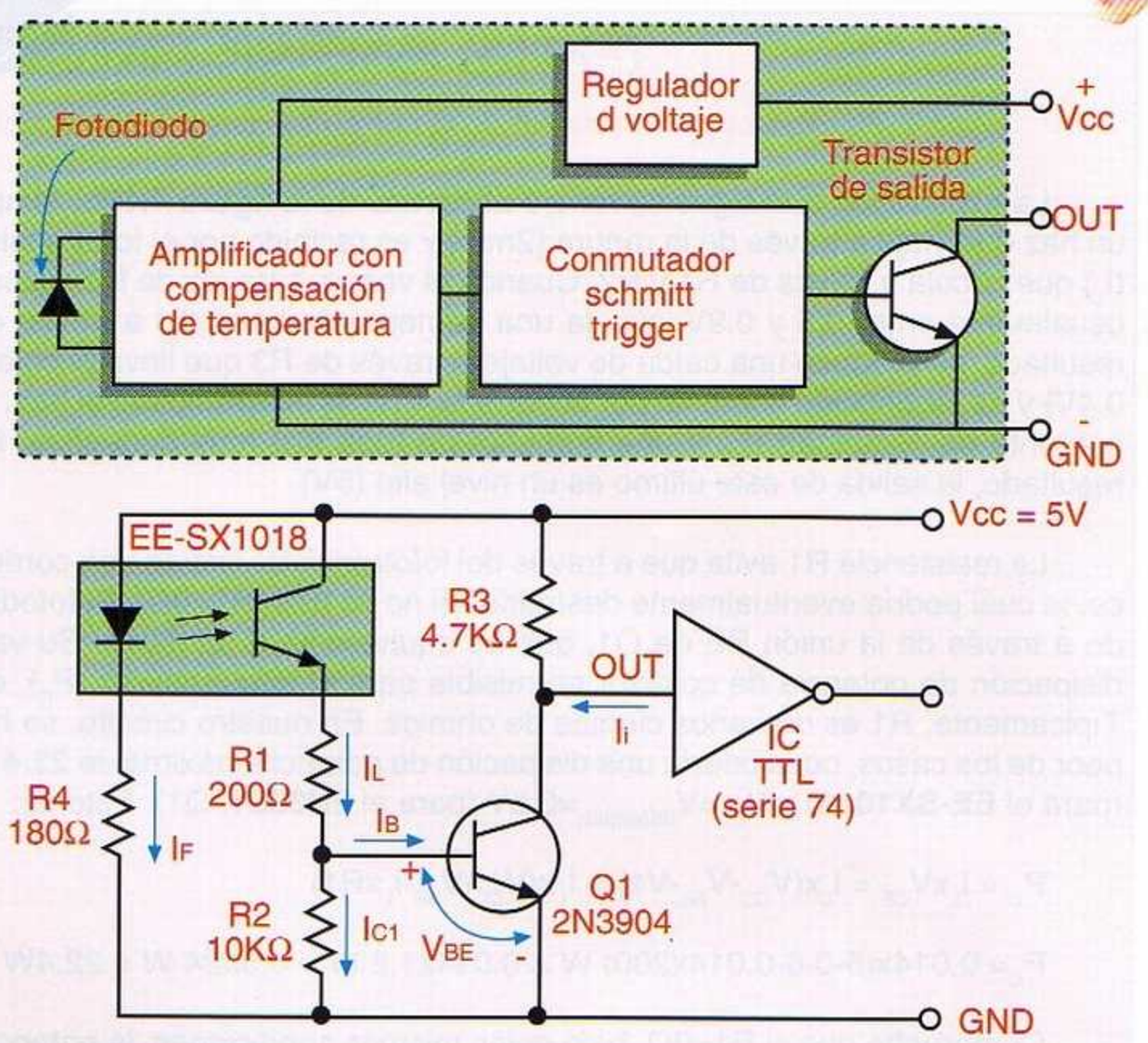


*Figura 4.19. Estructura interna típica de un foto-IC utilizado como receptor en un fotomicrosensor amplificado **(a)** y ejemplo de un circuito de aplicación práctico para un fotomicrosensor no amplificado **(b)**.*

Para saber más

Especificaciones y terminología de sensores fotoeléctricos

- **Alcance útil o nominal (Sn).** Distancia convencional que cubre el haz de luz, asignada por el fabricante.
- **Alcance de trabajo o campo de funcionamiento (Sa):** Distancia de trabajo real del haz de luz, teniendo en cuenta los diversos factores del entorno, es decir el medio ambiente que rodea al detector. Normalmente, es menor que el alcance útil. El entorno puede ser limpio o estar contaminado por polución, polvo, humo, vapor, lluvia, niebla, humedad, frío, vibraciones, choques, etc. A mayor contaminación del entorno, menor alcance de trabajo y viceversa. Se obtiene aplicando un factor de corrección al alcance útil, según el entorno, así: **1.00** para entornos limpios, **0.50** para entornos ligeramente contaminados, **0.25** para entornos medianamente contaminados, y **0.10** para entornos muy contaminados.
- **Ganancia en exceso**: Relación entre la cantidad de luz recibida por el fototransistor y la mínima cantidad de luz necesaria para la conmutación (umbral). Proporciona el margen de seguridad de funcionamiento de un detector de acuerdo a las condiciones del entorno. A mayor contaminación ambiental, se requiere una limpieza más frecuente y periódica de los lentes del emisor y receptor, así como de los reflectores. Para la selección de la ganancia mínima se pueden aplicar los siguientes criterios: **1.5** para entornos limpios, **5.0** para entornos ligeramente sucios, **10** para entornos moderadamente sucios y **50** para entornos muy sucios.
- **Sensibilidad**: Tamaño mínimo del objeto para poder ser detectado. También se refiere a la capacidad del objeto de reflejar la luz del emisor para que pueda retornar al receptor. En general, es una medida del cambio de intensidad lumionosa requerido por el sensor para causar una acción de conmutación a su salida. Depende, entre otros factores, de la cantidad de amplificación incorporada en la circuitería electrónica, la potencia lumínica del LED y el tamaño, forma y calidad del lente.
- **Velocidad de conmutación**: Duración de la señal de salida en función de la velocidad de paso y de las dimensiones del objeto. Se expresa en términos del **tiempo de respuesta** del sensor, definido como la máxima cantidad de tiempo que transcurre desde la transición de la entrada del modo de luz al de oscuridad, o viceversa, hasta que se produce la conmutación de la salida. Este tiempo puede ser evaluado como **T = (W - D)/V**, siendo **W** el tamaño del objeto, **D** el diámetro del haz en la posición de detección y **V** la velocidad de paso del objeto. Por ejemplo, si el diámetro del objeto es de **W**=24 mm, el ancho del haz de luz es **D**=12 mm y la velocidad del objeto es **V**=240 mm/s, el tiempo de respuesta requerido debe ser **Tr=50 ms** o mejor. En general, a medida que se incrementa la ganancia, disminuye la velocidad de conmutación, y viceversa.

Para saber más

Ejemplo de diseño de un circuito de aplicación con fotomicrosensor

La explicación que sigue se refiere al circuito de la **figura 4.19b**. Al aplicar una corriente I_F al LED, éste emite un haz que viaja a través de la ranura (2mm) y es recibido por el fototransistor, produciéndose una corriente de luz (I_L) que circula a través de R1 y R2. Cuando el voltaje a través de R2 excede el voltaje de polarización VBE de Q1, usualmente entre 0.6 y 0.9V, circula una corriente de base (I_B) a través de Q1 y este transistor conduce. Como resultado, se produce una caída de voltaje a través de R3 que lleva el colector de Q1 a un nivel lógico bajo (0.1V a 0.4V) y es reconocido como tal por la entrada TTL. Al interrumpirse el haz, a través del fototransistor sólo fluye una corriente de oscuridad (I_D) y una corriente de fuga ($I\alpha$) muy pequeñas, insuficientes para disparar a Q1. Como resultado, la salida de este último es un nivel alto (5V).

La resistencia R1 evita que a través del fototransistor circule una corriente I_L excesiva cuando el mismo conduce, la cual podría eventualmente destruirlo. Si no se usa (R1=0Ω), El fotodiodo quedaría virtualmente cortocircuitado a través de la unión BE de Q1, que es equivalente a un diodo. Su valor se escoge de acuerdo a la máxima disipación de potencia de colector permisible para el fototransistor (P_C), que en este caso es de 100mW@25°C. Típicamente, R1 es de varios cientos de ohmios. En nuestro circuito, se ha seleccionado R1=200Ω, lo cual, en el peor de los casos, ocasionaría una disipación de potencia máxima de **22.4 mW**. Se asume $I_L=I_{c(max)}$=14 mA =0.014A (para el **EE-SX1018**) y $V_{BE}=V_{BE(sat)min}$=0.6V (para el **2N3904**, Q1). Esto es:

$$P_C = I_L x V_{CE} = I_L x(V_{CC}-V_{BE}-V1) = I_L x(V_{CC}-V_{BE}-I_L xR1)$$

$$P_C = 0.014x(5-0.6-0.014x200)\ W = 0.014x1.6\ W = 0.0224\ W = 22.4W$$

Compruebe que si R1=0Ω, bajo estas mismas condiciones, la potencia disipada por el fototransistor sería del orden de **61.6 mW**, que está muy cerca del *rating* máximo.

La resistencia R2, por su parte, debe ser seleccionada de modo que garantice una caída de voltaje $V2_{ON}=(I_L-I_B)xR2$ más alta que el voltaje de polarización V_{BE} de Q1 cuando el fototransistor está ON y una caída $V2_{OFF}=(I_D+I\alpha)xR2$ más baja que este voltaje cuando el mismo está OFF. En nuestro caso, $V2_{ON}$= 2.3V y $V2_{OFF}$ = 0.1V, lo cual cumple con los requisitos anteriores. Para el calculo de $V2_{ON}$ se asume que $I_L=I_{L(min)}$=025mA (peor caso para el **EE-SX1018**) e $I_B=I_{Bmin}$=20mA y $V_{BE}=V_{BEONmax}$=0.8V (peores casos para el **2N3904**). Asimismo, para el calculo de $V2_{OFF}$ se asume que $I_D=I_{Dmáx}$=4nA e $I_d=I_{dmax}$=10mA (peores casos para el EE-SX1018) y $V_{BE}=V_{BE(OFF)}$=0.4V (peor caso para el 2N3904). En general, R2 puede seleccionarse de acuerdo al siguiente criterio:

$$R2 > V_{BE(ON)}/(I_L-I_B)$$

Compruebe que, con los mismos valores esperados, en el peor de los casos, para $V_{BE(ON)}$ (0.8V), I_L (0.25mA) e I_B (20mA), el valor mínimo de R2 debe ser de 3.48kΩ, aproximadamente. El valor real debe seleccionarse de modo que sea de dos a tres veces este valor mímimo. Por esta razón, utilizamos R2=1 kΩ. Compruebe que, con este valor de R1 y los valores esperados, en el peor de los casos, para I_D (4nA) e $I\alpha$ (10mA), la caída de voltaje sobre R1 es de apenas 0.1V, que está muy por debajo del valor esperado, en el peor de los casos, del $V_{BE(OFF)}$ de Q1 (0.4V).

Finalmente, las resistencias R3 y R4 se seleccionan en la forma usual. R3, en particular, debe escogerse de modo que no se exceda la máxima corriente de colector permisible por Q1 cuando está conduciendo (200mA para el **2N3904**), pero permita la correcta saturación de este transistor para que señalice adecuadamente la entrada TTL en el estado bajo. El valor de 4.7kΩ seleccionado satisface ambas condiciones.

La resistencia R4, por su parte, debe escogerse de modo que no se exceda la máxima corriente permisible por el LED del fotomicrosensor (I_{Fmax}), que para el **EE-SX1018** es de 50mA, pero permita una I_F suficiente que sature el fototransistor adecuadamente cuando el mismo recibe el haz y se genere así una corriente de luz (I_L) apropiada. Con el valor de R4 utilizado (180 Ω), la corriente del LED es I_F= 19.4mA, lo cual produce una corriente de luz de 4.5mA en el caso típico y de 0.25mA en el peor de los casos. Se asume que la caída de voltaje sobre el LED (V_F) es de 1.5 V, como máximo (1.2V valor típico). En general, R4 puede seleccionarse de acuerdo al siguiente criterio:

$$R4 > (V_{CC}-V_{Fmax})/I_{Fmáx})$$

Compruebe que con V_{CC}=5V y los valores antes indicados para V_{Fmax} (1.5V) e I_{Fmax} (50mA), el valor mínimo de R4 debe ser de 70Ω. El valor real debe seleccionarse de modo que sea dos a tres veces este valor mínimo. Por esta razón, utilizamos R4=180Ω.

Capítulo 5

Sensores para sistemas de control de movimiento

Los sensores de control de movimiento se utilizan para detectar y medir condiciones en una amplia variedad de aplicaciones industriales, desde el posicionamiento preciso de piezas sobre una banda transportadora hasta la coordinación exacta de los movimientos de un robot que ejecuta operaciones de soldadura. Este capítulo introduce a los sistemas de control de movimiento y examina los principales tipos de sensores de posición, desplazamiento, velocidad y aceleración disponibles actualmente para los mismos.

Generalidades

Los sistemas de control de movimiento desempeñan un papel fundamental en la industria. De hecho, el control de movimiento es la esencia de la producción industrial y no puede existir automatización industrial si no existe movimiento, **figura 5.1**. Aunque actualmente se dispone también de sistemas de control de movimiento neumáticos, hidráulicos y de otros tipos, los controles electrónicos, a los cuales nos referiremos en este capítulo, son los más comunes y los preferidos en la industria debido a las numerosas ventajas asociadas con ellos. Por ejemplo, son muy versátiles y eficientes, no requieren mantenimiento, son limpios y silenciosos, están en continua evolución, etc.

La función de un sistema de control de movimiento es convertir comandos de entrada en movimientos mecánicos controlados. Estos últimos pue-

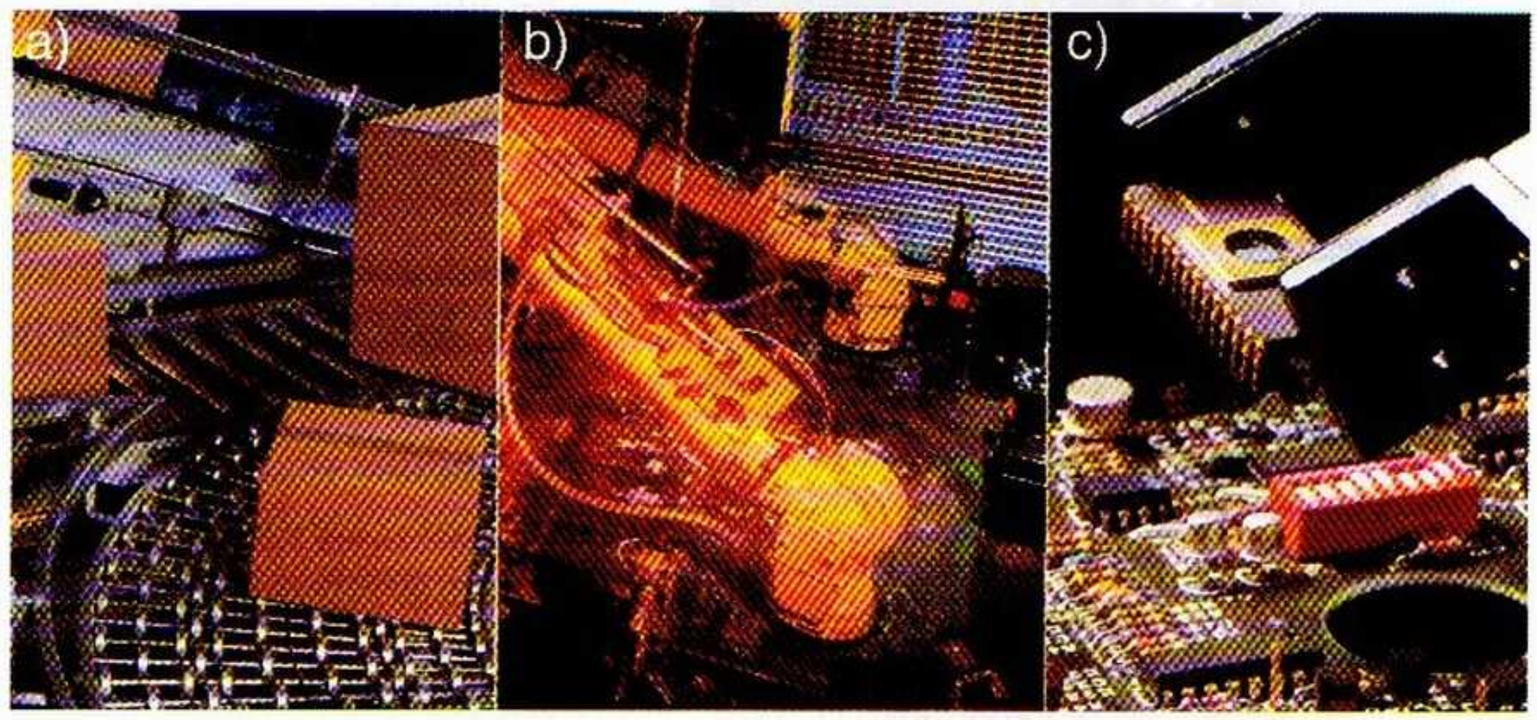


Figura 5.1. *Los sistemas de control de movimiento son la esencia de la automatización industrial. En la fotografía se ilustran algunos procesos donde estos sistemas desempeñan un papel clave.* ***(a)*** *Transporte de productos.* ***(b)*** *Robots.* ***(c)*** *Colocación automática de partes.*

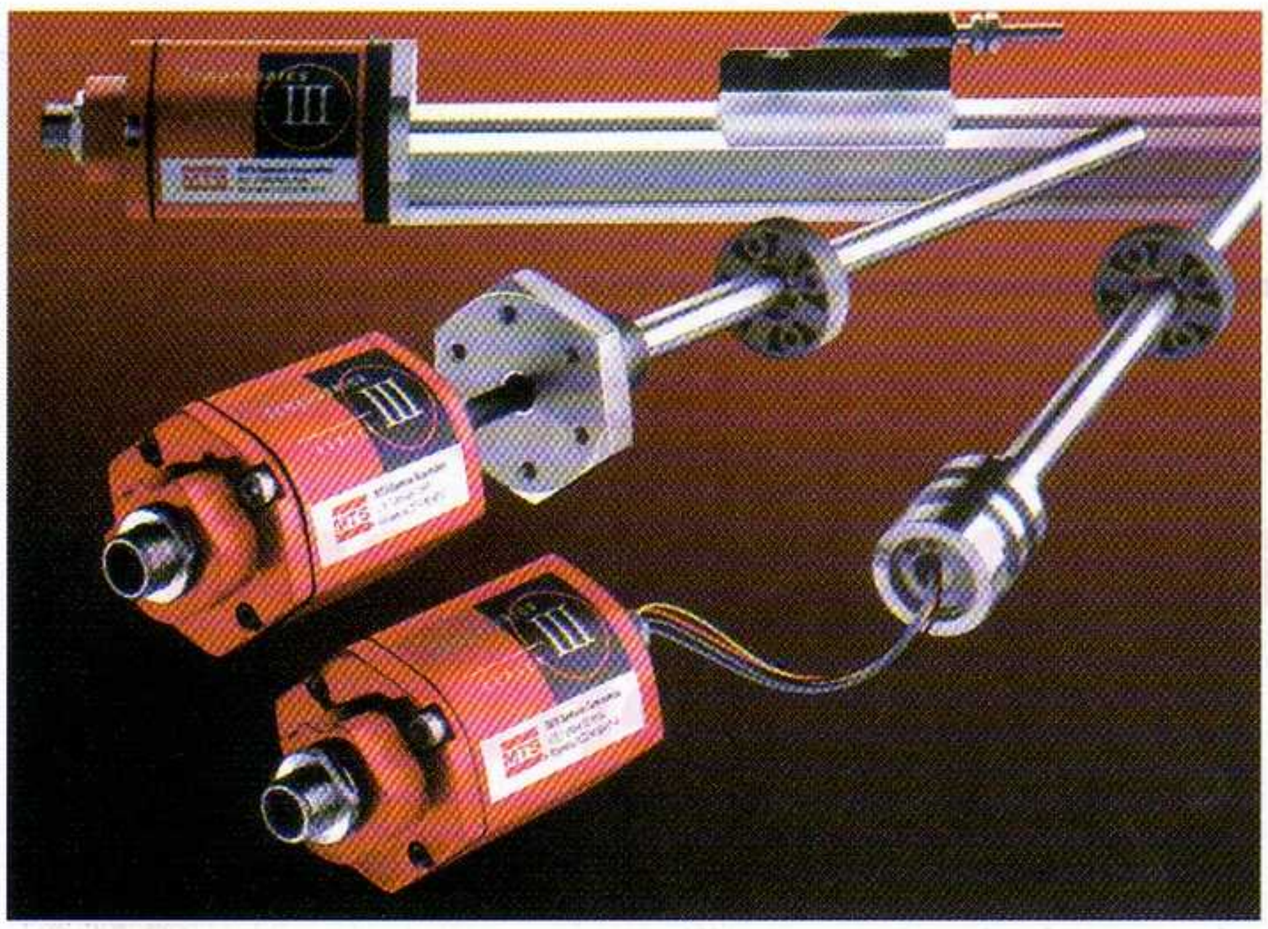


*Figura 5.2 Los sensores de movimiento monitorean condiciones de posición, velocidad , aceleración, etc., en un proceso y las realimentan al controlador del sistema en la forma de señales eléctricas. Los mostrados en la fotografía, fabricados por **MTS Systems** (www.mts.com), por ejemplo, detectan cambios de posición con una resolución de 25 micras (0.001"). Los mismos están basados en el efecto **magnetoestrictivo**, consistente en la expansión o contracción de ciertos materiales ferromagnéticos cuando se exponen a un campo magnético*

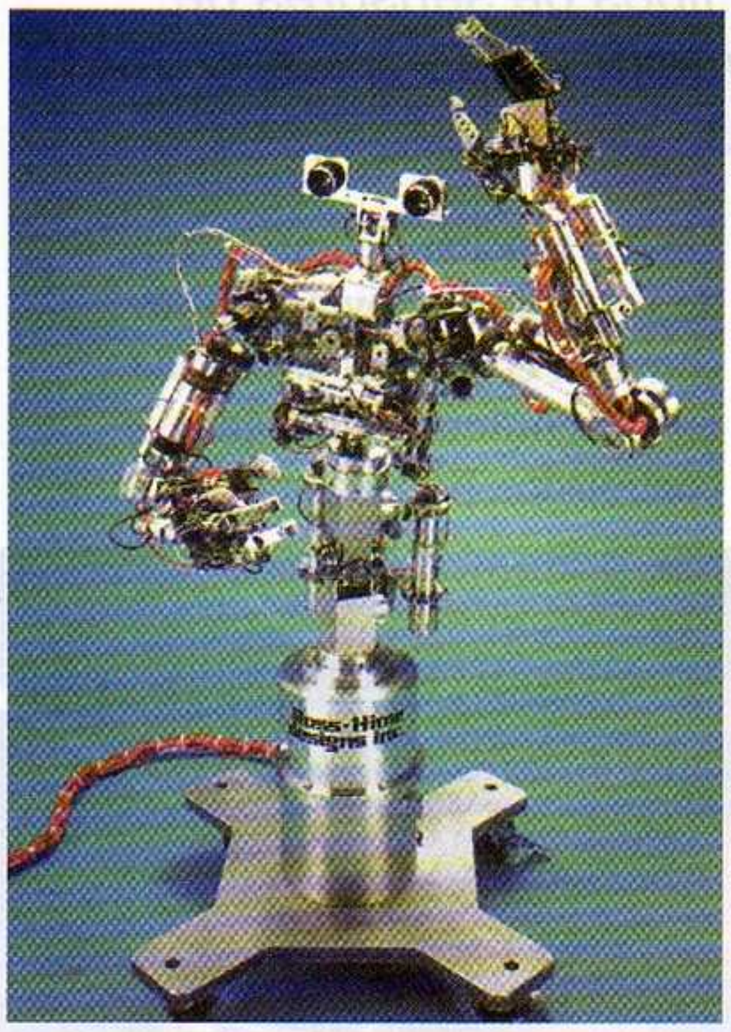


Figura 5.3. Los robots son la máxima expresión de los sistemas de control de movimiento. El mostrado en la fotografía, desarrollado por la NASA para investigación, tiene un rango de movimientos similares a los de la parte superior del torso humano.

den ser lineales, rotatorios o una combinación de ambos. Los comandos de entrada pueden ser proporcionados por un juego de levas o engranajes, un potenciómetro, un PLC, un computador, etc. De cualquier modo, la automatización de una aplicación que involucre movimiento sólo es posible si el sistema de control recibe información acerca de las condiciones de posición, velocidad, aceleración, etc., del proceso. Esta realimentación la suministran dispositivos como codificadores, potenciómetros, LVDTs, etc., varios de los cuales examinaremos en este capítulo, **figura 5.2**.

Antes de proceder al estudio de los principales sensores para sistemas de control de movimiento, es instructivo conocer qué son estos sistemas, cómo están estructurados y qué papel desempeña la realimentación en los mismos. El tema de los sistemas de control de movimiento es demasiado amplio para pretender un cubrimiento total del mismo. Por esta razón, en este capítulo sólo trataremos, por ahora, los aspectos básicos.

Introducción a los sistemas de control de movimiento

El término **control de movimiento**, en su sentido más amplio, se refiere al control preciso de cualquier cosa que se mueve, desde un robot que realiza operaciones de soldadura en una línea de ensamblaje hasta el sistema hidráulico de una grúa móvil, **figura 5.3**. En nuestro caso específico del control electrónico, nos interesan primariamente aquellos sistemas que trabajan con niveles de potencia dentro de un rango limitado, digamos por debajo de 10 hp (7 kW), y que requieren precisión en uno o más aspectos, por ejemplo la velocidad, la posición, el desplazamiento o cambio de posición, la rata de aceleración/desaceleración, el torque, etc. Estos son los parámetros básicos que maneja un sistema de control de movimiento cualquiera.

Un sistema de control de movimiento estándar se compone de tres elementos básicos: un

motor, un impulsor o *drive* y un controlador, **figura 5.4**. En algunos casos, el motor puede trabajar en lazo abierto, es decir sin ningún tipo de realimentación hacia el controlador, **figura 5.4a**. En otros, debe hacerlo en lazo cerrado, es decir asociado a algún tipo de sensor de movimiento, **figura 5.4b**. Asimismo, dependiendo de la complejidad de la aplicación, el controlador puede ser un módulo autónomo o consistir en una o más tarjetas que trabajan en línea con un PLC o una computadora personal (PC) y requieren de software especializado para su programación e interface con el usuario, **figura 5.4c**.

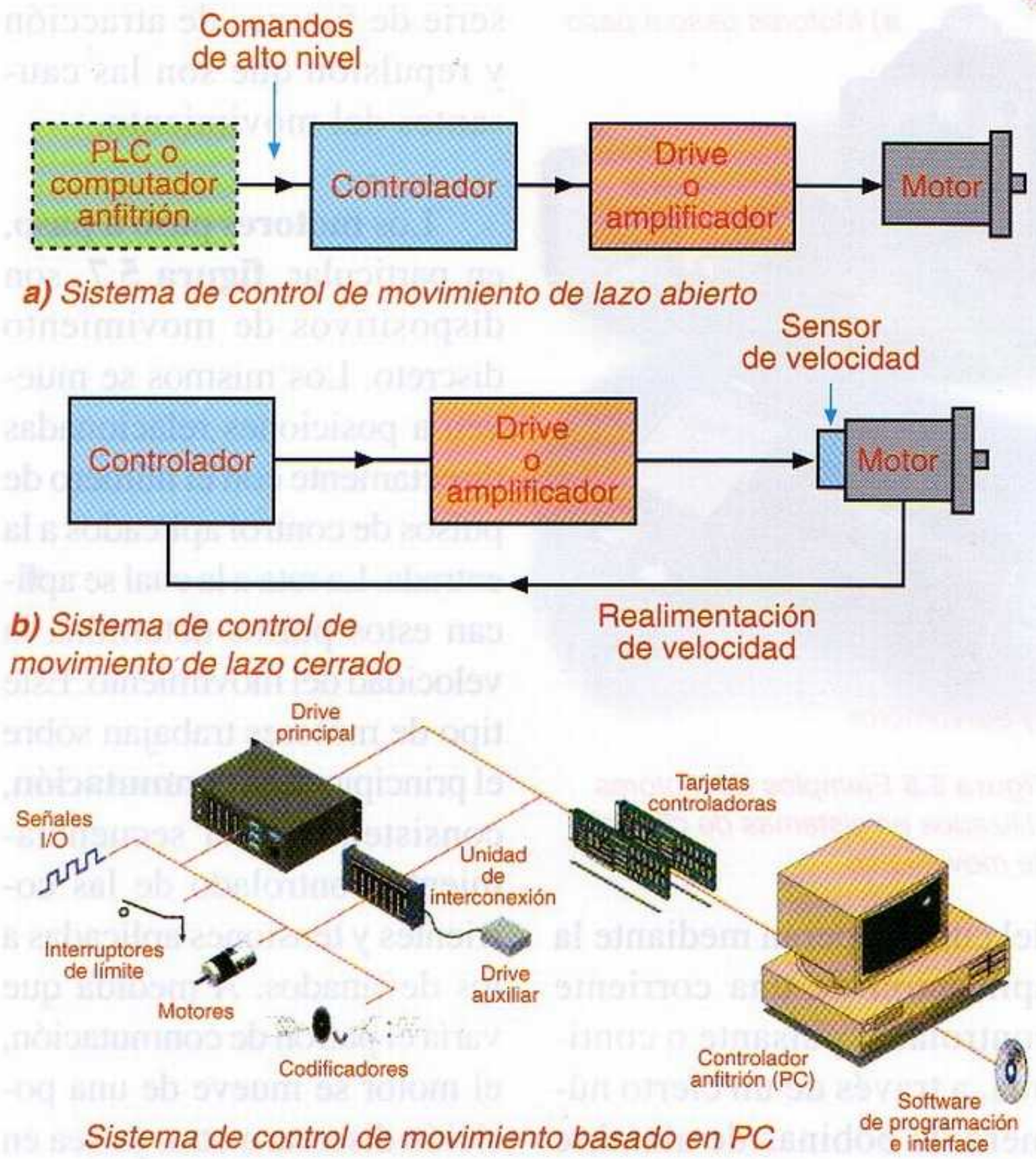


Figura 5.4. Componentes de sistemas de control de movimiento típicos.

El **motor** es la parte encargada de accionar la carga o dispositivo mecánico que debe ser movido, por ejemplo una máquina pulidora de discos compactos, **figura 5.5**. En este caso, se utilizan tres motores: uno (M1) para girar continuamente el disco a alta velocidad y dos (M2 y M3) para desplazar radialmente, a baja velocidad, las cabezas pulidora y sensora a través de la superficie del disco. Cuando se detecta un punto alto, M2 y M3 deben detenerse mientras la cabeza pulidora elimina el material levantado y M1 gira a una velocidad constante. Esta última, en general, depende de la posición de las cabezas y debe incrementarse a medida que las mismas exploran el disco desde el exterior hasta el centro.

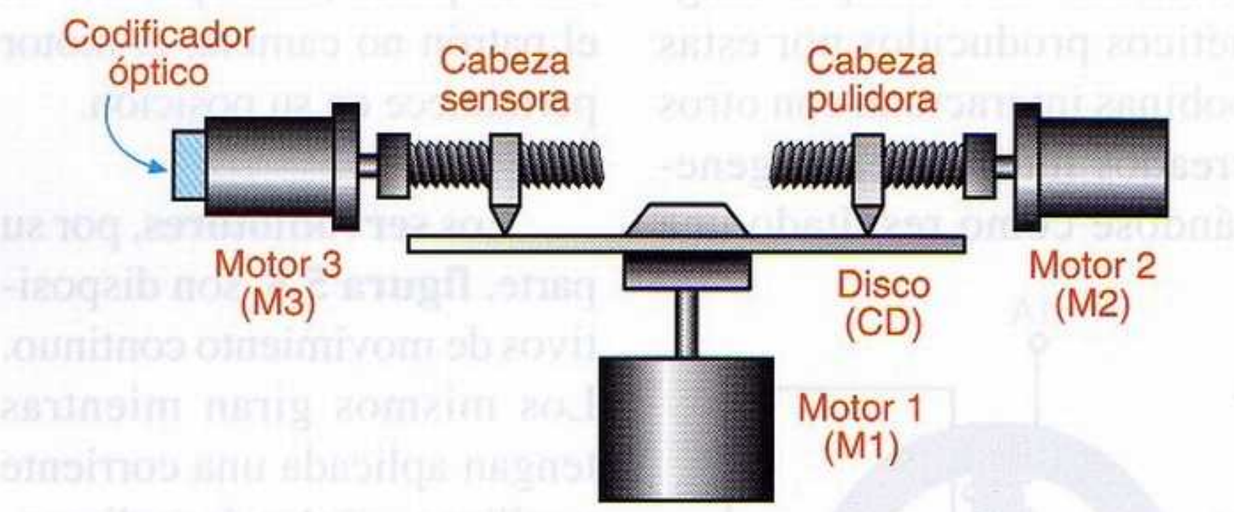


Figura 5.5 Estructura genérica de una máquina pulidora de discos compactos. Típicamente, M1, encargado de girar el disco, es un servomotor sin escobillas, mientras que M2 y M3, encargados de desplazar las cabezas pulidora y sensora, son motores paso a paso, perfectamente sincronizados. El codificador, acoplado a M2 o M3, informa la posición de las cabezas, la cual es utilizada por el controlador de M1 para calcular la velocidad del disco. Esta última es máxima en el centro.

Los principales tipos de motores utilizados en los sistemas de control de movimiento son los motores paso a paso (*steppers*) y los servomotores, **figura 5.6**. Ambos tipos, cuyo funcionamiento y características se examinan en detalle en el **Capítulo 16** de esta sección

Figura 5.6 Ejemplos de motores utilizados en sistemas de control de movimiento

del curso, operan mediante la aplicación de una corriente controlada, pulsante o continua, a través de un cierto número de bobinas de alambre orientadas en posiciones específicas. Los campos magnéticos producidos por estas bobinas interactúan con otros creados internamente, generándose como resultado una serie de fuerzas de atracción y repulsión que son las causantes del movimiento.

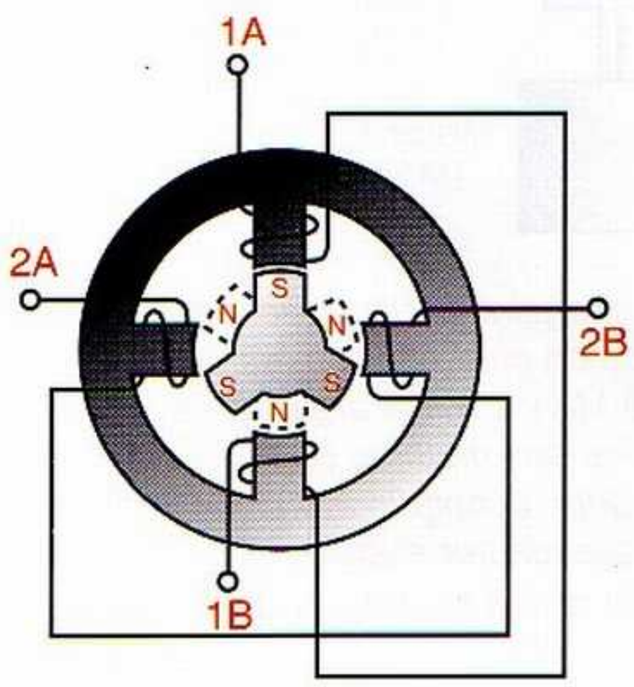


Figura 5.7 Principio de funcionamiento de un motor paso a paso. El modelo mostrado corresponde a un motor híbrido simple de 12 pasos por revolución.

Los **motores paso a paso**, en particular, **figura 5.7**, son dispositivos de movimiento discreto. Los mismos se mueven a posiciones relacionadas directamente con el número de pulsos de control aplicados a la entrada. La rata a la cual se aplican estos pulsos determina la velocidad del movimiento. Este tipo de motores trabajan sobre el principio de la **conmutación**, consistente en el secuenciamiento controlado de las corrientes y tensiones aplicadas a los devanados. A medida que varía el patrón de conmutación, el motor se mueve de una posición discreta a otra, ya sea en pasos completos o en fracciones de pasos (micropasos). Si el patrón no cambia, el motor permanece en su posición.

Los **servomotores**, por su parte, **figura 5.8**, son dispositivos de movimiento continuo. Los mismos giran mientras tengan aplicada una corriente y utilizan señales de realimentación para proporcionar un control preciso de la posición y la velocidad en un ambiente de lazo cerrado. El campo magnético interno es producido por imanes permanentes. Existen servomotores AC y DC. Los más utilizados en sistemas de control de movimiento son los servos DC de escobillas y los servos AC y DC sin escobillas. También se dispone de servomotores y motores paso a paso **lineales**, los cuales no giran, sino que se mueven en línea recta.

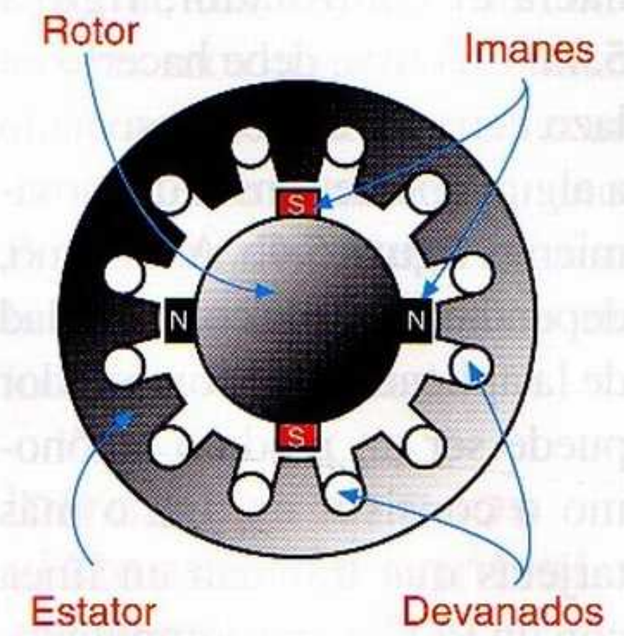


Figura 5.8 Principio de funcionamiento de un servomotor DC sin escobillas. En este caso, la parte rotatoria o rotor se convierte en un imán permanente, mientras que los devanados de campo se colocan en la parte fija o estator.

Un servomotor trabajando en lazo abierto rota o se mueve descontroladamente a medida que se le aplica potencia. Por esta razón, los sistemas de servomotor requieren una señal de realimentación para garantizar que el posicionamiento del motor y el mantenimiento de la velocidad se realicen de una manera confiable y precisa, siguiendo las trayectorias de movimiento especificadas por el usuario. La realimentación la proporciona típicamente un **codificador**, **figura 5.9**, montado directamente en el eje del motor o acoplado mecánicamente a él. Los codificadores se examinan más adelante en este mismo capítulo. La realimentación es opcional en sistemas de motores paso a paso.

Los dispositivos de realimentación, en general, proporcionan señales que llevan datos de posición y velocidad al controlador de movimiento. Estas señales son convertidas en el controlador en valores cuantificables que representan una posición o una velocidad, es decir un cambio de posición sobre un período fijo de tiempo. En el caso de sistemas que controlan movimiento en varios ejes, cada eje tiene señales de realimentación separadas.

Figura 5.9. Ejemplo de un codificador óptico

Los **impulsores** o ***drives***, **figura 5.10**, son amplificadores electrónicos que toman las señales de control de bajo nivel generadas por el controlador y las convierten en señales de potencia apropiadas para impulsar el motor o motores conectados a los mismos. Los *drives* se diseñan específicamente para operar con un tipo particular de motor. En consecuencia, un *drive* para un motor paso a paso, por ejemplo, no puede usarse para impulsar un servomotor DC de escobillas, y viceversa. Los *drives* deben incluir una o más fuentes de alimentación para proporcionar las corrientes y tensiones demandadas por el sistema, tanto en condiciones normales, como durante las fases de arranque y aceleración del motor.

En la **figura 5.11** se muestra como ejemplo la estructura genérica de un *drive* para motores paso a paso. Los pulsos de paso y la señal de dirección, provenientes del controlador, son recibidas por un circuito lógico y convertidas en un patrón de formas de onda adecuado para excitar los devanados del motor a través de un juego de interruptores de potencia de estado sólido.

Se requiere un pulso para que el motor se mueva un paso en la dirección especificada, de modo que pueden ser necesarios desde 200 hasta 100,000 o más pulsos para producir una revolución completa. En el caso de un motor de 400 pasos/revolución operando a 25,000 rpm, por ejemplo, esto implica que la frecuencia de los pulsos debe ser de 750kHz.

El **controlador** es una parte esencial de cualquier sistema de control de movimiento porque es el que determina finalmente la tarea real realizada por el motor o motores del mismo. El controlador fija la velocidad, la posición, la dirección, la ace-

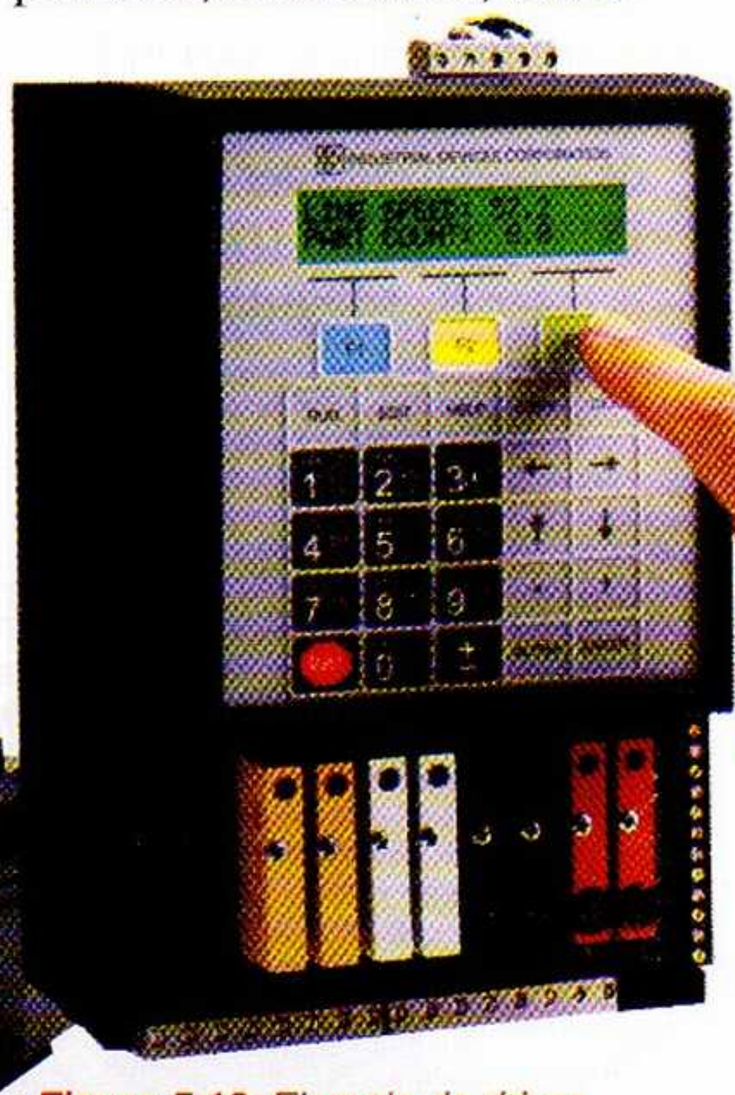


Figura 5.10. Ejemplo de driver para servomotores y/o motores paso a paso

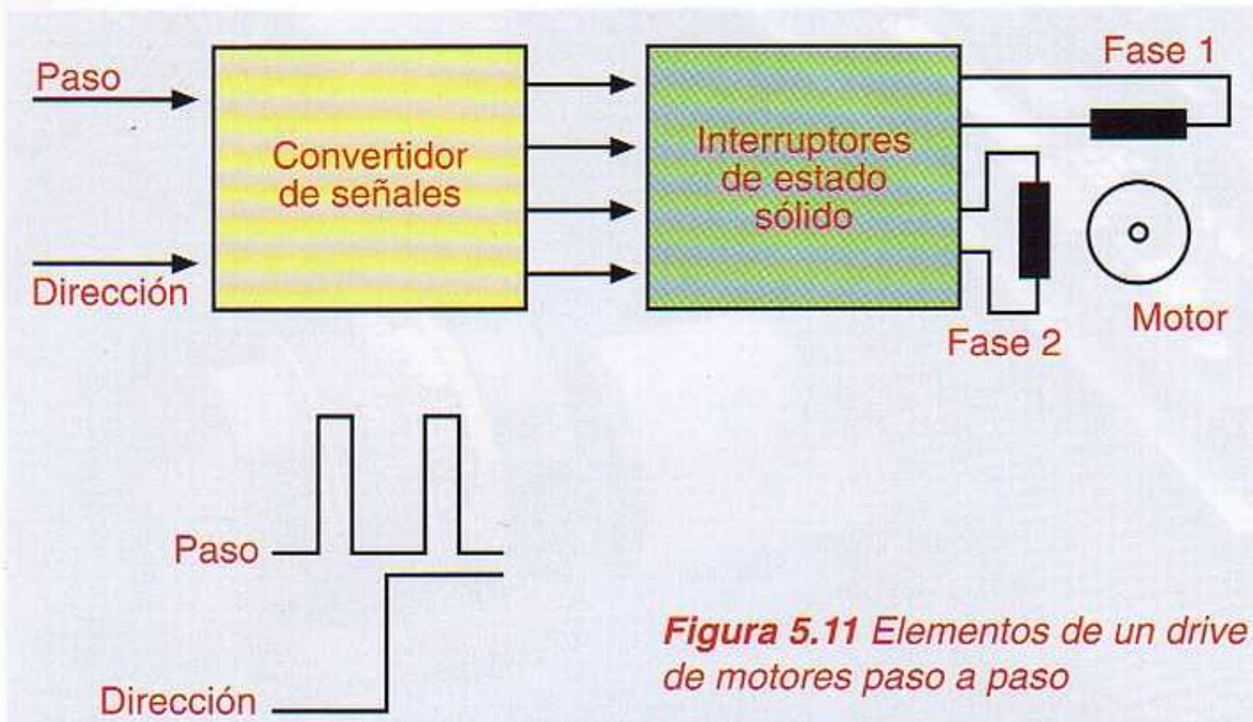


Figura 5.11 Elementos de un drive de motores paso a paso

leración, y otros parámetros relacionados con la operación realizada por el motor. La salida del controlador, que se conecta a la entrada del *drive*, puede consistir en un voltaje análogo, un juego de señales de paso y dirección, o una combinación de ambas. La mayoría incluye entradas y salidas adicionales que les permiten también ocuparse de otras funciones en una máquina.

La función de control puede ser realizada por un controlador autónomo (*standalone*) o estar distribuida entre un controlador anfitrión, digamos un PLC o un PC, y una unidad esclava. Esta última la constituyen una o varias tarjetas que residen en el PC, se comunican con él a través de un bus estándar y aceptan comandos de alto nivel, **figura 5.12**. Un controlador operando en conjunción con varios *drives* y motores puede manejar coordinadamente movimientos en dos o más ejes, constituyendo lo que se denomina un **sistema multiaxial**. Una variante son los **sistemas multiplexados**, en los cuales se gobiernan varios motores con un sólo controlador y un sólo *drive* sobre una base de tiempo compartido.

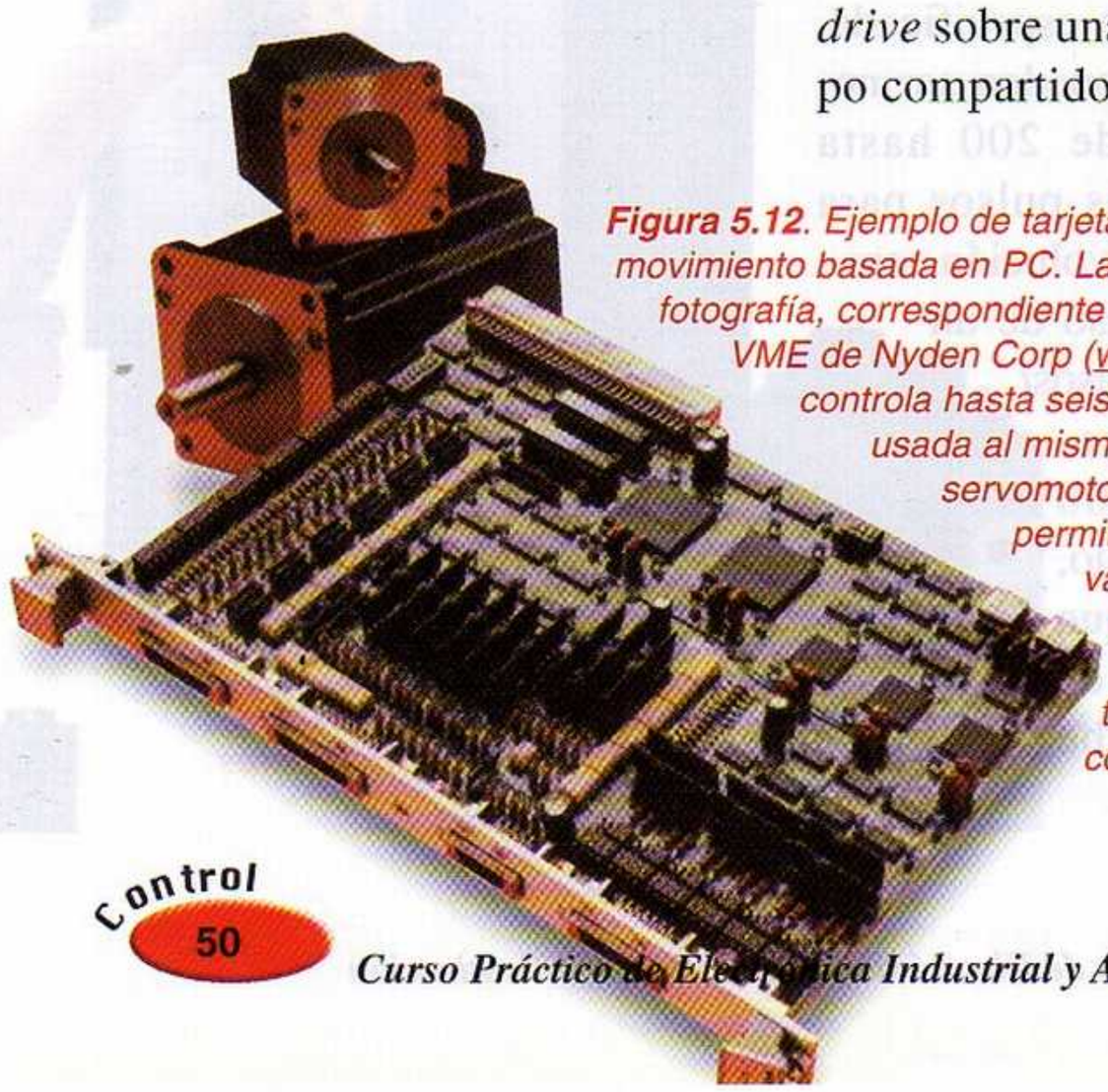


Figura 5.12. Ejemplo de tarjeta de control de movimiento basada en PC. La mostrada en la fotografía, correspondiente al modelo PG106 VME de Nyden Corp (www.nyden.com), controla hasta seis ejes, puede ser usada al mismo tiempo con servomotores y steppers y permite configurar varios tipos de perfiles de movimiento, tanto básicos como complejos.

La firma **National Instruments** (www.natinst.com), por ejemplo, ofrece dos grandes series de tarjetas controladoras de movimiento, basadas en PC, denominadas **FlexMotion** y **ValueMotion**. Los controladores **FlexMotion**, en particular, se utilizan para aplicaciones avanzadas que implican secuencias de posicionamiento coordinadas hasta en seis ejes. Los controladores **ValueMotion**, por su parte, se utilizan en aplicaciones de propósito general que involucran hasta cuatro ejes. Ambos tipos disponen de una amplia variedad de herramientas de software para el desarrollo de aplicaciones en Windows, **figura 5.13.** Esto es aplicable, en general, a cualquier tarjeta moderna de control de movimiento.

Adicionalmente, las tarjetas de control de movimiento modernas ofrecen una amplia variedad de modos de operación que proporcionan características funcionales y operacionales a un alto nivel simplificando la solución de todo tipo de problemas. Algunos de los modos más importantes se representan simbólicamente en la **figura 5.14** y se explican a grandes rasgos en el recuadro "**Para saber más**" de la página 52. El modo de funcionamiento deseado es una consideración muy importante en la selección del controlador, junto con el tipo de mo-

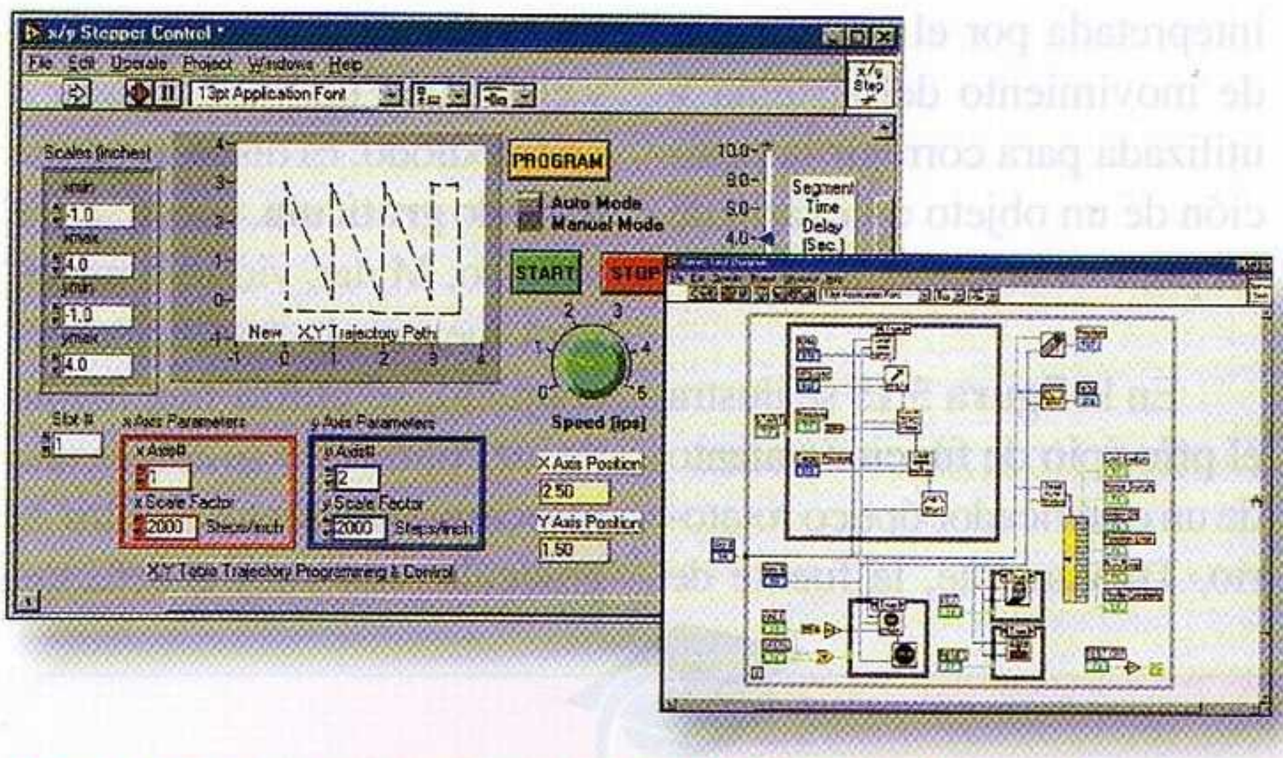


Figura 5.13. Las tarjetas de control de movimiento modernas disponen de una gran variedad de herramientas de software para el desarrollo de todo tipo de aplicaciones. Estas incluyen, entre otras opciones, librerías de ***instrumentos virtuales*** *(VIs), como las mostradas en la ilustración, ejemplos de programas en C, Visual Basic, LabWindows, LabView, etc., y librerias de funciones con enlaces dinámicos (DLLs) capaces de proveer comunicación directamente con proyectos en C y Visual C++.*

tor o motores requeridos, el número de ejes de movimiento que deben ser controlados, la dependencia del PC anfitrión, etc.

Sensores de posición. Codificadores incrementales

Los sistemas de control de movimiento manejan cuatro tipos de variables: posición, velocidad, aceleración/desaceleración y torque. La **posición** se refiere a la localización física de un objeto con respecto a un punto de referencia, la **velocidad** a la rata cambio de la posición y la **aceleración/desaceleración** a rata de cambio de la velocidad. El **torque** o **par** es una medida de la fuerza rotacional necesaria para mover o acelerar un objeto, o mantenerlo frenado o girando a una velocidad determinada. Por ahora, nos enfocaremos en las técnicas de medición y control de posición y velocidad. Los sistemas de control de aceleración, torque y otras variables mecánicas relacionadas se examinan en el **Capítulo 6**.

Tanto la posición como los cambios de posición (**desplazamientos**) son ítems de interés primario en muchos procesos. Las líneas de ensamble automatizadas que utilizan robots, por ejemplo, demandan el posicionamiento preciso de partes. De igual modo, el fresado, torneado y taladrado de piezas en una máquina de control numérico, así como el movimiento del cabezal en un *drive* de disco duro, requieren la medición y el control exacto de la posición. Adicionalmente, la medición de variables como presión, peso, nivel, temperatura, etc., requieren muchas veces su conversión a un desplazamiento equivalente antes de ser convertidas a señales eléctricas mediante sensores de posición.

Existen varios tipos de sensores de posición y desplazamiento, tanto angular como lineal. Los más utilizados en sistemas de control de movimiento, y a los cuales nos referiremos principalmente en este capítulo, son los codificadores ópticos, los potenciómetros y los transformadores diferenciales lineales (LVDTs). También se dispone de otras estructuras de sensores de posición magnéticos, ópticos, capacitivos, etc., como los codificadores magnéticos, los sincros, los resolucionadores (*resolvers*) y los transductores de desplazamiento lineal, entre otros.

Los **codificadores ópticos**, **figura 5.14**, son dispositivos electromecánicos basados en la utilización de un disco o rotor

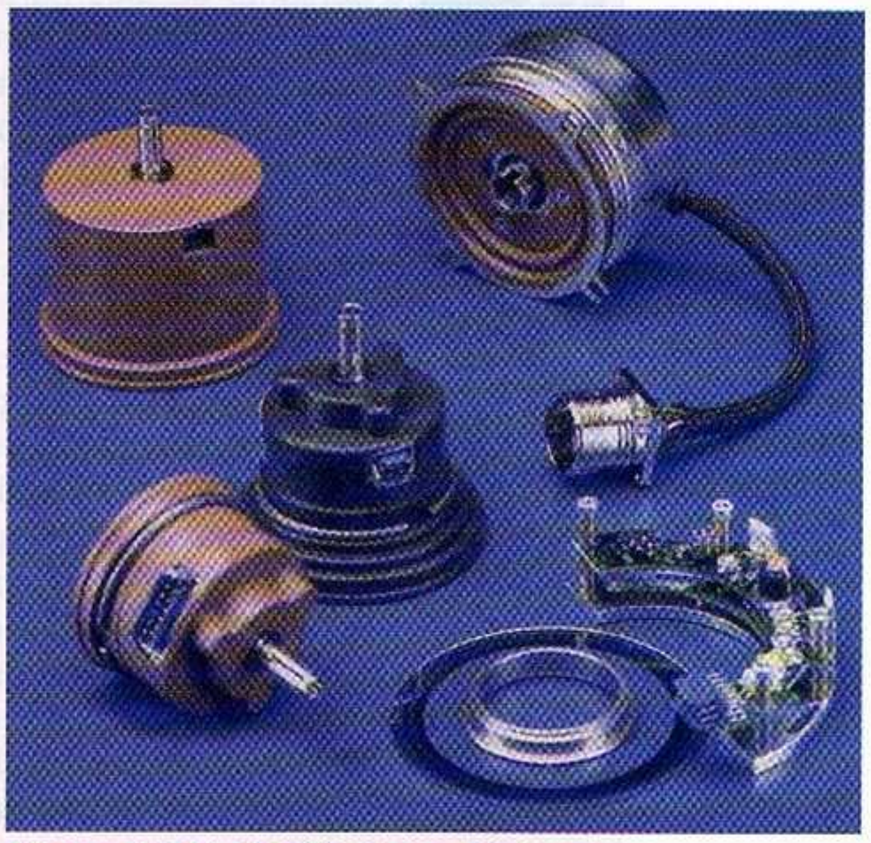


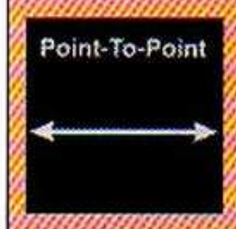
Figura 5.14. Codificadores ópticos

ranurado, acoplado a un eje, que se mueve entre una fuente de luz y un detector. A medida que gira el disco, un patrón de áreas transparentes y oscuras impreso en el mismo habilita o inhibe selectivamente el paso de luz hacia el detector, produciéndose como respuesta una señal digital que puede ser fácilmente intepretada por el controlador de movimiento del sistema y utilizada para corregir la posición de un objeto o llevarlo de un punto a otro.

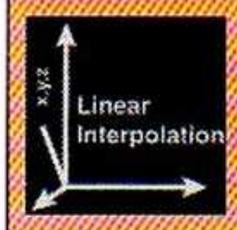
En la **figura 5.15** se ilustra el principio de funcionamiento de un codificador óptico rotatorio. Típicamente, la fuente de luz es un LED infrarrojo o láser y el detector un fototransistor o un fotodiodo. El disco, también llamado **gratícula**, puede ser de plástico, Mylar, vidrio o metal. Para mejorar la resolución del conjunto, se utiliza una fuente de luz colimada y se coloca una máscara estacionaria entre la gratícula rotatoria y el detector.

Para saber más

Modos de operación de los controladores de movimiento

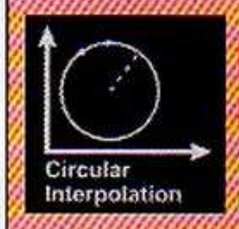


Modo punto a punto. Cada eje se programa independientemente con los parámetros del perfil de movimiento deseado. Los valores de la velocidad, la aceleración, la desaceleración, la posición del objetivo, etc., se cargan con prioridad al comando de arranque.

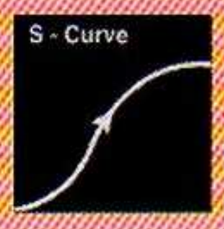


Modo de interpolación de vector lineal. Se pueden asignar ejes a un espacio vectorial. El control de movimiento de los ejes sigue exactamente el camino vectorial deseado, a los valores programados de los vectores de velocidad, aceleración y desaceleración. Los espacios vectoriales pueden contener uno, dos o tres ejes y se pueden sincronizar múltiples espacios vectoriales. También se pueden secuenciar y mezclar perfiles de movimiento para conseguir una transición más uniforme.

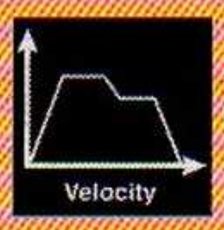
Modo maestro/esclavo o engranaje electrónico. Se puede configurar cualquier eje o conjunto de ejes para correr a una relación de velocidad determinada con respecto a cualquier eje maestro. El eje maestro puede ser únicamente la realimentación del codificador, o un motor bajo control de lazo cerrado. Estos modos se usan, por ejemplo, en bobinadoras de alambre, cuchillas rotatorias, etiquetado de alta velocidad, etc.



Modos de interpolación circular, esférica y helicoidal. Los parámetros de movimiento que describen arcos, vectores de velocidad y aceleración/desaceleración, radio, ángulo de arranque, y ángulo del objetivo se cargan antes de comenzar el movimiento. Para interpolación helicoidal, se carga también la altura del objetivo (Z), mientras que para interpolación esférica se especifican dos ángulos de arranque y dos de objetivo. El movimiento acelerará hacia la velocidad vectorial mientras sigue el camino indicado por los ángulos y la altura del objetivo.



Modos de curva S de aceleración y desaceleración. Proporcionan completa flexibilidad en el control de perfiles para suavizar el movimiento y eliminar las sacudidas de sistemas mecánicos. El grado de pendiente de la curva S en un perfil de movimiento es controlado por factores de suavizado separados para la aceleración y la desaceleración.



Modo de perfilado de velocidad. Proporciona una aceleración programada por el usuario a una velocidad objetivo deseada, la cual es exactamente mantenida hasta que se carga un nuevo valor de velocidad de objetivo. Usted puede cambiar la velocidad sobre la marcha.

Modo de trote (*jog*). Se puede programar cualquier eje para correr a una determinada velocidad, llamada **velocidad de trote** (*jogging*), usando valores cargados de aceleración, desaceleración y dirección. Cuando se proporciona un comando de arranque, el motor corre a la velocidad de trote hasta que se actualiza un parámetro sobre la marcha o se suministra un comando de parada.

Modo de registro. Se utiliza para capturar la posición exacta durante las transiciones de una señal de entrada de alta velocidad. Así se elimina la latencia y se proporciona un control preciso del motor a altas velocidades. Los valores de posición de entrada capturados son automaticamente combinados con un movimiento de registro. El nuevo movimiento puede ser completado autónomamente.

Modo home. Se usa durante la calibración y la inicialización del sistema. Se ejecuta a través de unos comandos que controlan el movimiento para buscar el interruptor de home y un pulso índice opcional. Este último proviene generalmente del codificador de realimentación. Una vez localizado, el sistema se mueve a la posición de offset del índice.

Los codificadores ópticos rotatorios pueden ser **incrementales** o **absolutos**. Los primeros generan un pulso cada vez que el eje gira un tramo definido, mientras que los segundos proporcionan una palabra o código digital de salida para cada posición del eje. También se dispone de **codificadores ópticos lineales,** los cuales determinan la posición de un brazo que se mueve paralelo a un eje.

En la **figura 5.16** se muestra la estructura básica de un codificador óptico incremental rotatorio. Su principal elemento es un disco ranurado, acoplado a un eje, el cual gira entre la fuente de luz y el detector. Esta disposición básica produce a la salida del detector una señal con un nivel DC (*offset*) dependiente de la temperatura, lo cual hace el sistema poco confiable en muchas aplicaciones.

Para solucionar este inconveniente, en la práctica se utilizan realmente dos fotodetectores, dispuestos de modo que produzcan dos señales o **canales** en cuadratura, es decir con una diferencia de fase de 90° entre ellas, **figura 5.17**. Esta característica permite multiplicar la resolución del codificador y es muy útil para determinar la dirección de rotación del eje.

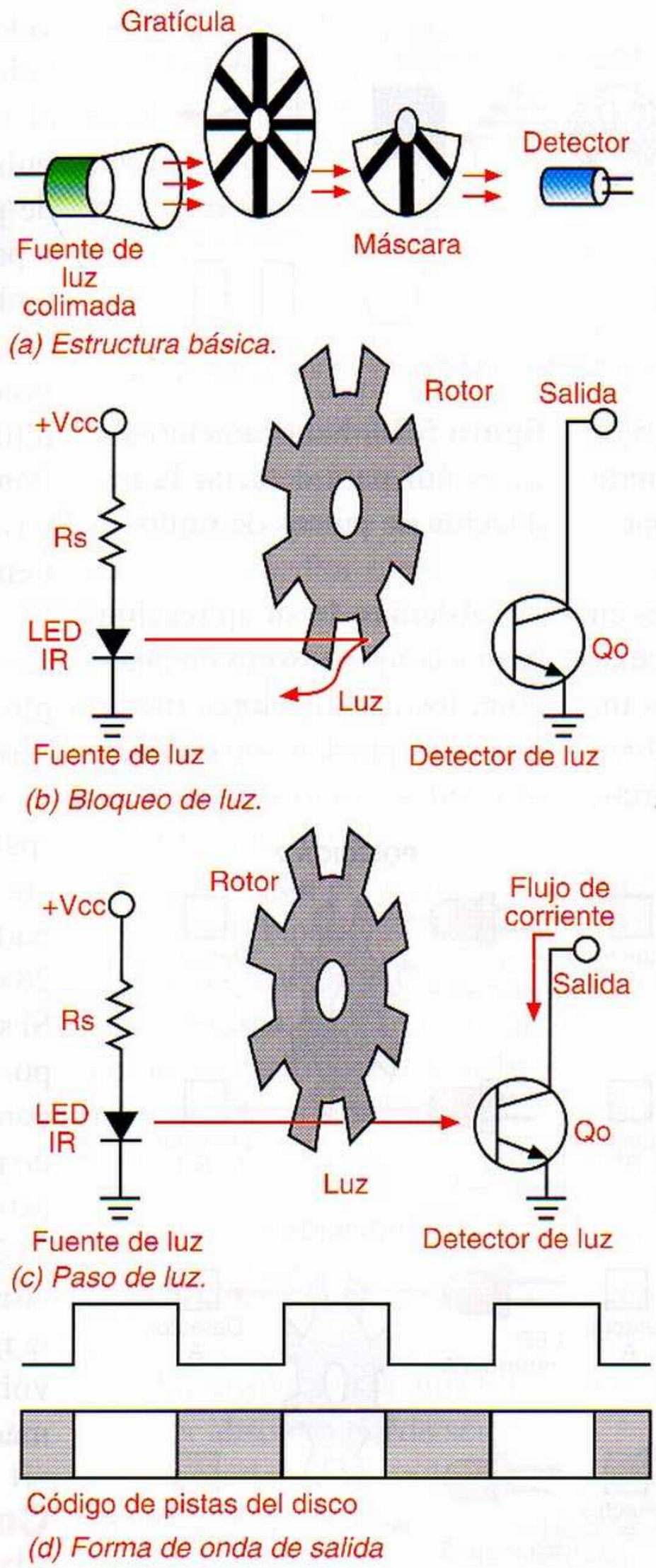


Figura 5.15 Principio de funcionamiento de un codificador óptico rotatorio.

Adicionalmente, muchos codificadores incrementales incluyen un tercer canal llamado **marcador**, **índice** o **canal Z**, el cual entrega un pulso por cada revolución y se utiliza para establecer la posición cero o de referencia.

El disco de un codificador óptico incremental, **figura 5.18,** es generalmente de vidrio o metálico y posee una serie de marcas o ranuras posicionadas de una forma muy precisa. La cantidad de marcas o ranuras define la **resolución** o número de pulsos por revolución (ppr) del sistema. Naturalmente, entre mayor sea el diámetro del disco, mayor es el número potencial de pulsos por revolución que pueden acomodarse.

En la mayoría de los casos, los discos de los codificadores incrementales incluyen dos pistas de marcas o ranuras en cuadratura (canales A y B), las cuales producen dos ondas cuadradas desfasadas 90° entre sí. Estas últimas se utilizan para determinar la dirección del movimiento. Por ejemplo, si el canal B adelanta al canal A, el eje está girando en sentido antihorario (CW).

La detección en cuadratura permite también minimizar los errores debidos a vibraciones y duplicar o cuadruplicar la resolución del codificador. Mediante esta técnica, ilustrada en la **figura 5.19**, una sola marca o ranura en cuadratura equivale a dos o cuatro pulsos. Por tanto, un codifica-

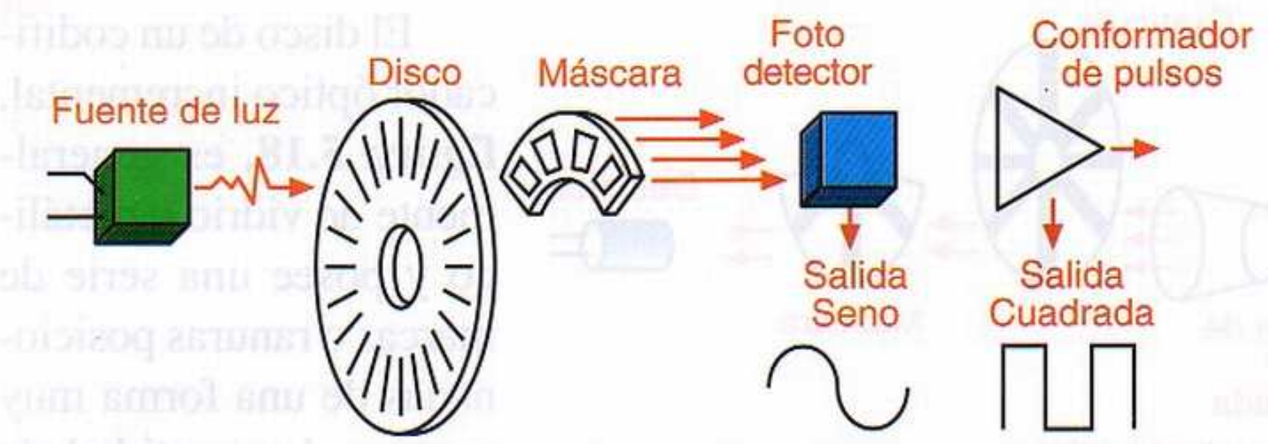


Figura 5.16 Estructura de un codificador óptico incremental rotatorio

dor con una resolución original de 1,000 ppr se convierte en uno de 2,000 o 4,000 ppr.

En adición a los canales en cuadratura y de marca normales, muchos codificadores incrementales entregan también sus señales complementarias, **figura 5.20**. Esta característica es útil para detectar la inducción de pulsos de ruido.

Además de su aplicación básica como sensores de posición, los codificadores incrementales pueden ser también utilizados como sensores de velocidad. La información de velocidad se deriva midiendo el intervalo de tiempo entre pulsos o contando el número de pulsos dentro de una base o período dado de tiempo. En ambos casos, el codificador actúa como un tacómetro de precisión, dependiendo esta última de la perfección de los flancos del disco codificador y/o la exactitud de la base de tiempo externa.

Considérese, por ejemplo, un disco de 4,000 ppr acoplado al eje de una máquina que gira a 1680 rpm (28 rps). En este caso, la frecuencia de los pulsos de salida del codificador es simplemente 28x4,000=112,000 Hz o pps. Si se utiliza una base de tiempo de 15 ms asociada a un contador decimal, el número de pulsos registrados durante este lapso sería, por tanto, 112,000x0.015=1680. Esta cifra (1680) es numéricamente igual a la velocidad, en revoluciones por minuto, de la máquina.

Codificadores absolutos

Los codificadores absolutos son dispositivos sensores de posición relativamente sofisticados que proporcionan un código digital de salida para cada posición del eje impulsor del disco. Por tanto, no requieren de un pulso de marca (Z) ni de dispositivos de conteo y sincronización externos para

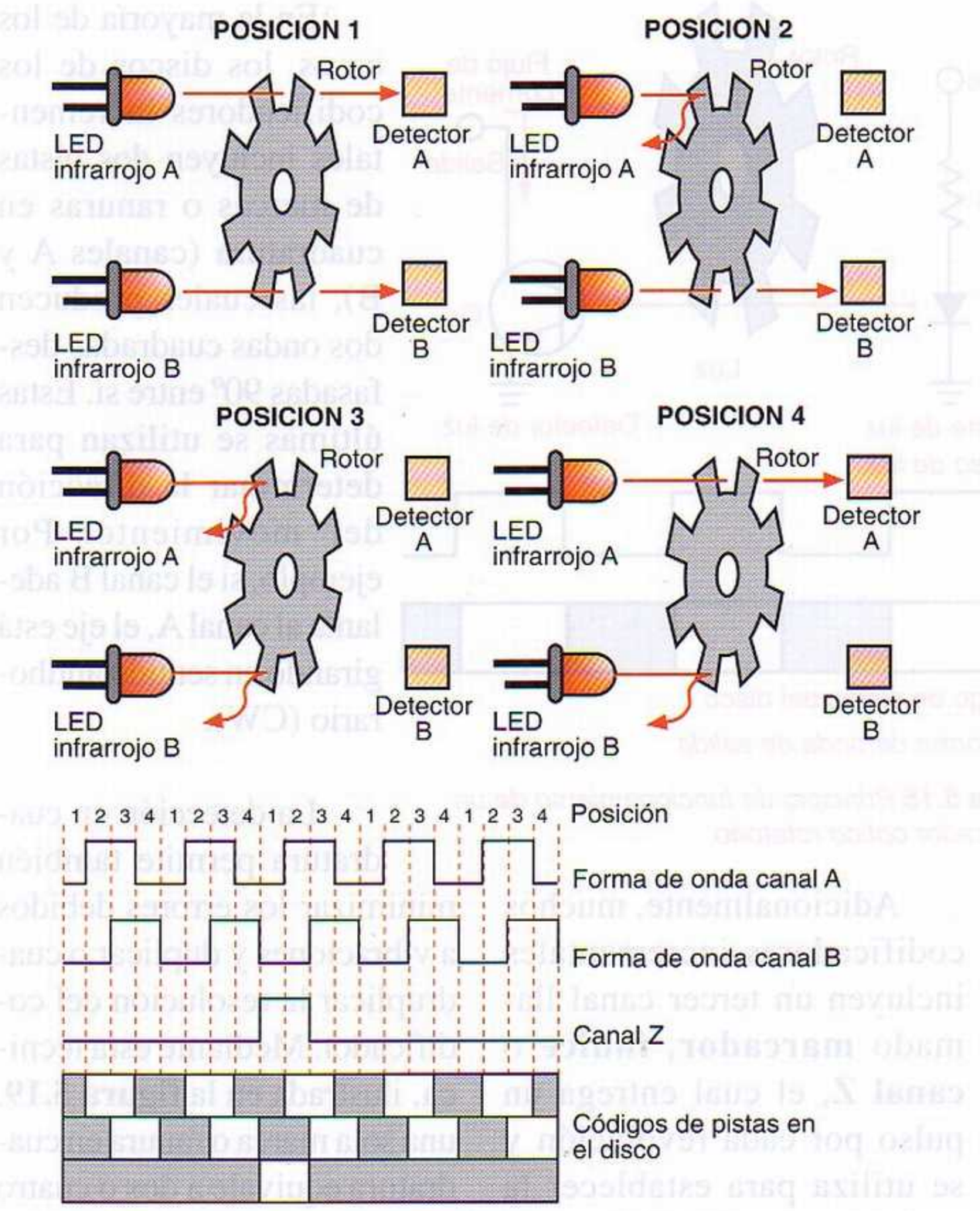


Figura 5.17 Canales de salida en cuadratura en un codificador incremental

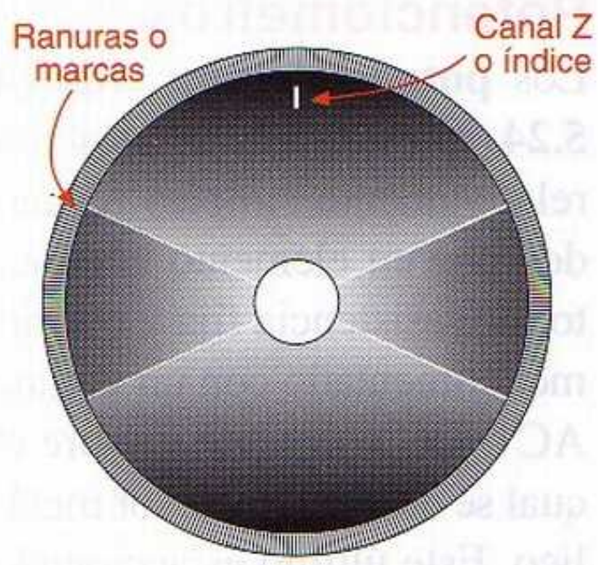


Figura 5.18 Estructura de un disco de codificador incremental

determinar la posición del mismo. Esta característica los hace particularmente adecuados en aplicaciones de control de movimiento y de procesos donde las fallas en el suministro de potencia son frecuentes, y en situaciones donde es difícil o imposible establecer un punto de referencia.

Los codificadores absolutos son muy similares en su estructura interna a los codificadores incrementales. Las principales diferencias radican en la construcción del disco, el número de pistas o canales de salida requeridos y la complejidad de la electrónica utilizada. El disco, **figura 5.21**, generalmente metálico, está constituido por varias pistas concéntricas, cada una asociada a una fuente de luz y a un detector

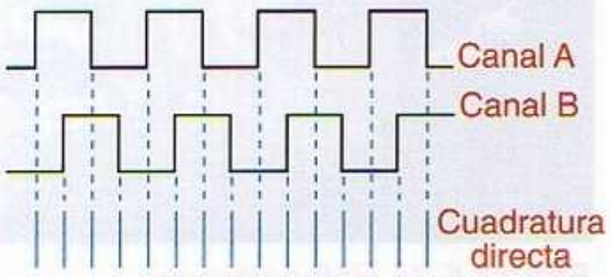


Figura 5.19 Cuadruplicando la resolución de un codificador

independientes. La posición del eje se identifica mediante el patrón de **1**'s y **0**'s generado en cada punto. Este patrón es único para cada posición e independiente de los de las demás posiciones.

El número de pistas determina la **resolución**, es decir la cantidad de información de posición que puede ser derivada del disco. Por ejemplo, si el disco tiene 10 pistas, la resolución del codificador sería de 1,024 ppr (posiciones por revolución).

El código de posición proporcionado por el disco es generalmente binario, BCD, gray o una variante de este último. En la **figura 5.22** se muestra como ejemplo una salida binaria de cuatro bits. En la práctica, son comunes las configuraciones de 8 y 16 bits. Estos formatos facilitan la interface directa con PLCs y tarjetas PC.

La resolución de un codificador absoluto puede ser incrementada acoplando mediante engranajes uno o más discos absolutos al disco de alta resolución primario. El sistema así constituido se denomina un **codificador absoluto multivuelta, figura 5.23**.

Por ejemplo, si a un disco primario de 10 pistas, es decir con una resolución de 1,024 ppr, se le engrana un segundo

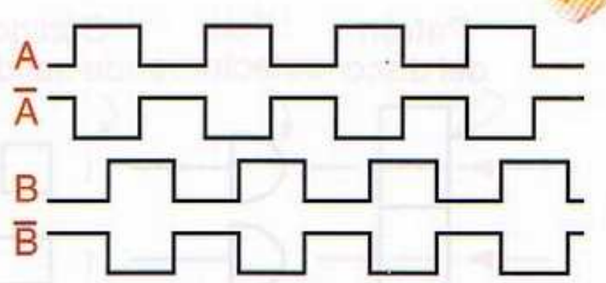


Figura 5.20 Señales de salida complementarias

disco de tres pistas con una relación de 8:1, entonces el codificador así formado tiene ahora una resolución de 8,192 ppr, equivalente a una rotación absoluta de 8 vueltas del eje. Un tercer disco de las mismas características proporcionaría una resolución de 65,536 ppr (64 vueltas de posición absoluta), un cuarto disco una resolución de 524,288 ppr (512 vueltas), y así sucesivamente.

Los codificadores absolutos ofrecen algunas ventajas notables con respecto a los codificadores incrementales. En primer lugar, al estar la información de posición del eje grabada mecánicamente en el disco codificador, no la pierden en caso de una falla en el suministro de

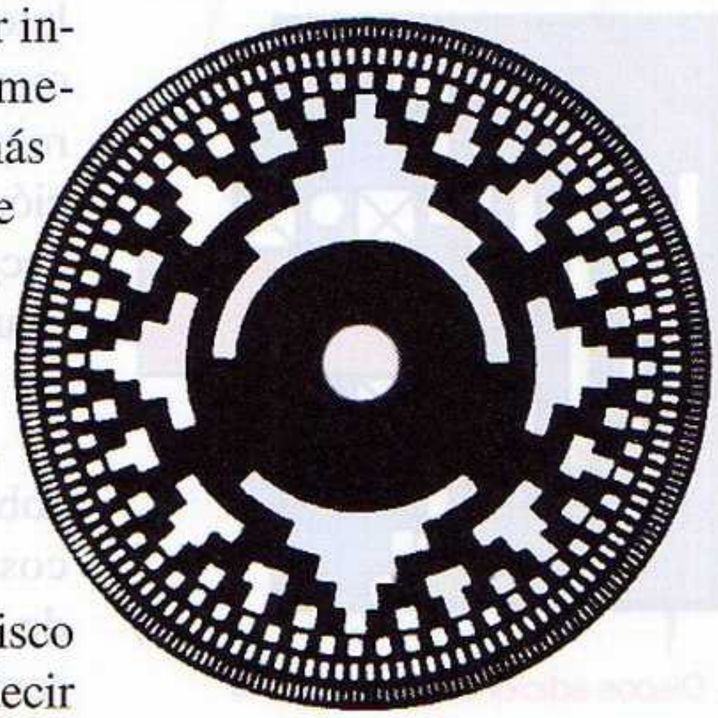


Figura 5.21 Estructura de un disco de codificador absoluto

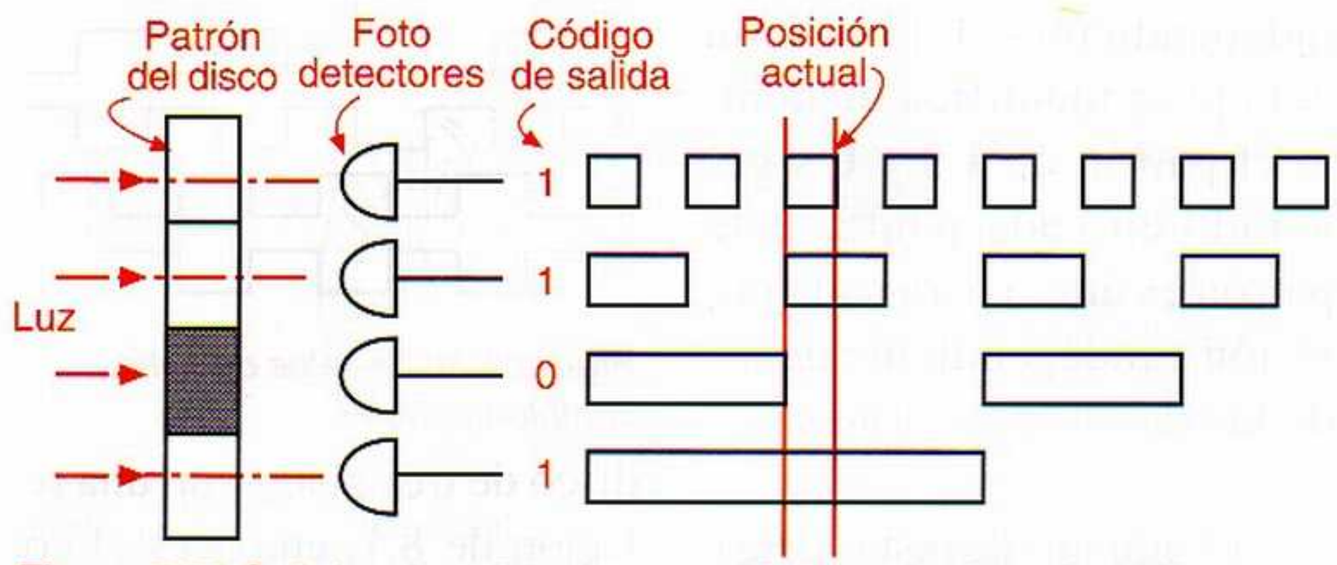


Figura 5.22 Señales de salida de un codificador absoluto de 4 bits

potencia y pueden leerla inmediatamente se restablezca este último. Por la misma razón, pueden operar confiablemente en ambientes eléctricamente ruidosos.

Los codificadores absolutos tampoco necesitan referirse a un punto de referencia para determinar la posición del eje puesto que siempre conocen esta información. En máquinas con múltiples ejes o que no pueden invertir su sentido de rotación, esta característica es de vital importancia porque no siempre es posible establecer un punto de referencia.

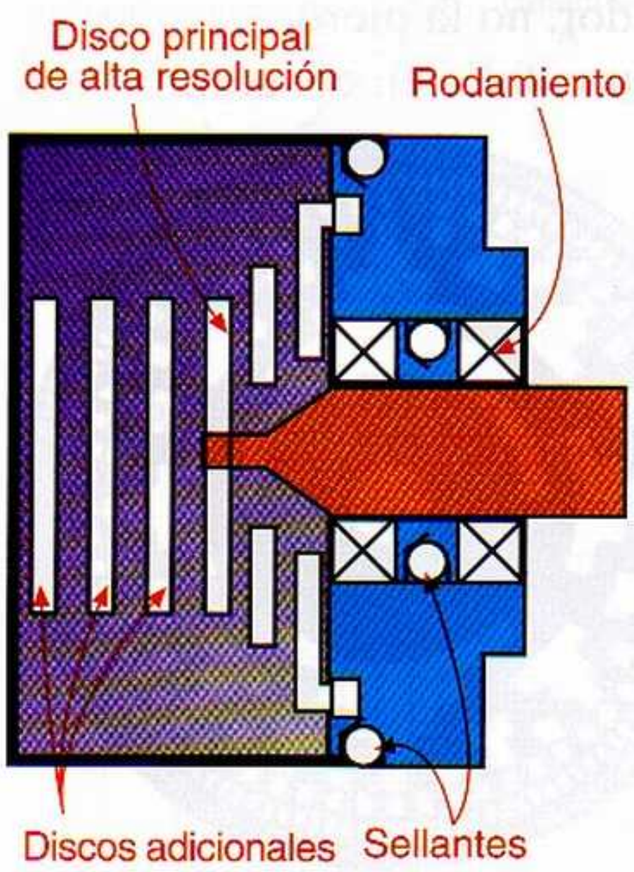


Figura 5.23 Codificador absoluto multivuelta

Adicionalmente, los codificadores absolutos no presentan las limitaciones de velocidad impuestas por el contador de un sistema incremental debido a que no necesitan de dispositivos de conteo ni la observación continua de la posición del eje o la carga. Por tanto, pueden operar a muy altas velocidades, superiores a 100 kHz.

De todas formas, los codificadores incrementales son una excelente opción en aplicaciones donde el costo es un factor importante y el retorno a un punto cero conocido después de una falla en el suministro de potencia no es un problema. Los codificadores absolutos se reservan para aplicaciones más críticas o cuando se requiere trasferir la información de posición directamente decodificada a una computadora u otro tipo de controlador.

Para más información sobre otros aspectos prácticos relacionados con el uso de codificadores ópticos, se remite al lector al **Capítulo 4** de la sección de **Actividades Prácticas**.

Potenciómetros

Los **potenciómetros, figura 5.24**, son sensores de posición relativamente simples formados por un elemento conductor de resistencia fija y uniforme, alimentado con un voltaje AC o DC constante y sobre el cual se desliza un cursor metálico. Este último es accionado por el eje de movimiento del sistema o el objeto bajo medición, de modo que a cada posición corresponde un voltaje equivalente entre el cursor y cualquiera de los extremos.

Son generalmente del tipo rotatorio, con un grado de libertad de 330°, aunque también existen potenciómetros de carrera lineal. Por ejemplo, si se aplican 10V entre los extremos de un potenciómetro rotatorio y se obtiene una lectura de 4V entre el extremo de referencia y el cursor, entonces el eje ha girado exactamente 132° desde el origen.

Los potenciómetros tienen la reputación de ser imprecisos debido, entre otros, a los siguientes factores:

Figura 5.24 Potenciómetro rotatorio de acoplamiento magnético

- El desgaste ocasionado por el movimiento del cursor sobre el elemento resistivo, así como la acumulación de residuos procedentes de fricción y oxidación, y las variaciones de temperatura, afectan directamente la resistencia. Estos problemas han sido resueltos con el desarrollo de nuevos materiales, incluyendo ciertos plásticos conductores que no se desgastan ni oxidan.

- La fuerte dependencia del voltaje de salida (Vo) del voltaje aplicado (V). En este caso, cualquier variación en V afecta directamente a Vo. Por esta razón, muchas veces se prefiere medir la relación V/Vo en lugar del voltaje Vo. Este método se denomina **ratiométrico** y tiene la ventaja de entregar una salida que sólo depende del ángulo girado por el cursor.

Los potenciómetros, como veremos más adelante, se utilizan también como transductores primarios para sensar presión, nivel, y otras variables físicas. Asimismo, mediante disposiciones especiales, pueden ser utilizados como **inclinómetros**, es decir medidores de ángulos de inclinación, **figura 5.25**. Algunos de estos dispositivos utilizan como elemento resistivo un fluido electrolítico, contenido en un tubo de vidrio y dentro del cual se forma una burbuja de aire. Otros, por su parte, consisten en un sustrato vertical que soporta un resistor y un conductor concéntricos. Este último guía una bola metálica que hace las veces del cursor y permanece en posición vertical. En ambos casos, al inclinar el tubo o el soporte, cambia la resistencia entre el electrodo central y los de los extremos.

Figura 5.25 Inclinómetros o potenciómetros de medición de inclinación

Transformadores variables

Los **transformadores variables**, cuyo principio de funcionamiento se ilustra en la **figura 5.26**, miden desplazamientos o cambios posicionales variando la posición relativa de uno o más devanados secundarios con respecto al devanado primario. Cuando esto se hace, varían el acoplamiento magnético y la inductancia mutua entre ambos devanados, y por tanto la tensión inducida en el secundario. Esta última es proporcional al coseno del ángulo de inclinación. Con respecto a los codificadores y los potenciómetros, los transformadores variables ofrecen las siguientes ventajas:

- Por su baja masa inercial, imponen menos carga mecánica al eje de giro.
- Por su construcción más robusta, soportan mejor los choques, las vibraciones y las altas temperaturas.
- Pueden transmitir información analógica de posición a distancias hasta de 2 km.

Las ventajas inherentes de los transformadores variables han llevado al desarrollo de diversas configuraciones físicas, siendo una de las más simples el llamado **potencióme-**

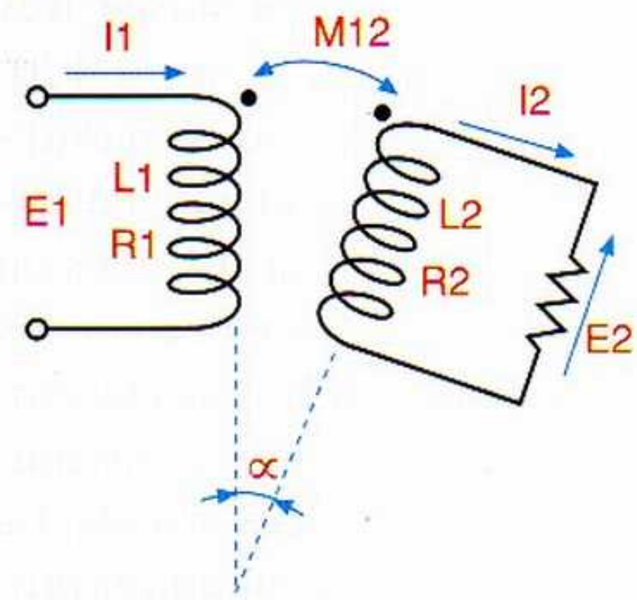


Figura 5.26 Principio de funcionamiento de un transformador variable

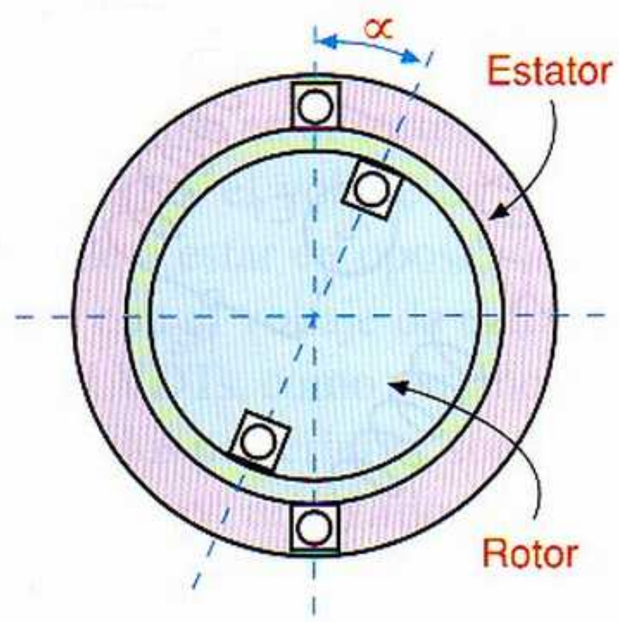


Figura 5.27 Potenciómetro de inducción

tro de inducción, figura 5.27, formado por dos devanados planos concéntricos, uno fijo (estator) y otro móvil (rotor), cada uno con su propio núcleo ferromagnético. Al alimentar cualquiera de ellos con una tensión AC, en el otro se induce una tensión proporcional al coseno del ángulo de inclinación entre los mismos. Otras estructuras importantes de transformadores variables son los sincros, los *resolvers* y los *inductosyn*.

Los **sincros**, por ejemplo, **figura 5.28**, constan de un estator cilíndrico y un rotor en forma de H que gira solidario al eje cuya rotación se va a medir. El estator posee tres devanados dispuestos a 120° entre sí y conectados en estrella, y el rotor uno o tres devanados. Al aplicar una tensión AC al rotor, se inducen en las bobinas del estator tres tensiones en fase, diferenciadas únicamente por su envolvente. La amplitud de esta última es proporcional, respectivamente, a

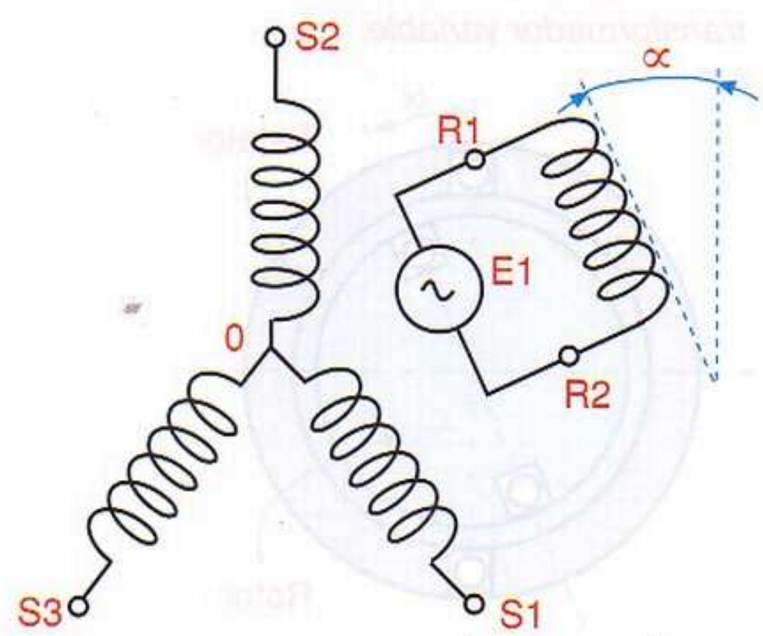


Figura 5.28 Transformador trifásico sincrónico o sincro

senα, sen (α+120°) y sen (α+240°), siendo α el ángulo de inclinación del rotor. En un caso típico, la tensión AC aplicada al rotor es del orden de 26V @ 400 Hz. Otros valores usuales de voltaje y frecuencia son 11.8V, 115V, 50 Hz, 60 Hz y 2600 Hz.

Los ***resolvers*** o **resolucionadores, figura 5.29**, son similares en su construcción a los sincros, excepto que sus devanados están dispuestos formando un ángulo de 90° tanto en el estator como en el rotor. Nuevamente, a medida que gira el eje, cambia la posición relativa entre los devanados del rotor y el estator, lo cual causa que varíe la amplitud o el desplazamiento de fase de la señal inducida en el secundario. A partir de esta información puede deducirse la posición angular del eje, utilizándose para ello varios métodos, siendo los más comunes el seguimiento ratiométrico y la digitalización de fase. La estructura mostrada en la **figura 5.29** corresponde al primer caso.

Observe que cuando la bobina del rotor está en la posición α=0°, la misma queda paralela a la bobina coseno y perpendicular a la bobina seno. Por tanto, la tensión inducida en la primera es máxima y en la segunda es cero. A medida que el rotor se mueve de la posición de 0° hacia la

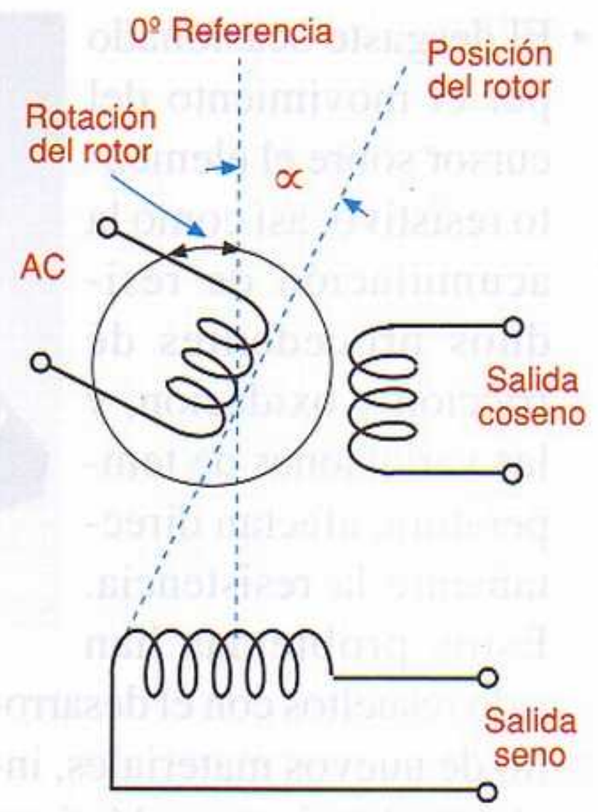


Figura 5.29 Principio de funcionamiento de un resolver de seguimiento ratiométrico

posición de 90°, se induce progresivamente menos voltaje en la bobina coseno y más en la bobina seno. Del mismo modo se analizan las otras posiciones. Por tanto, cualquier valor de α entre 0 y 360° está determinado por una combinación única de formas de onda producidas en las bobinas seno y coseno. Procesando estas señales mediante un convertidor A/D apropiado puede determinarse la posición absoluta.

En un ***resolver* de digitalización de fase, figura 5.30**, hay dos devanados en el rotor a 90° y dos devanados en el estator, también a 90°. El dispositivo opera sobre el principio de que un desplazamiento de fase entre una señal de referencia fija y el voltaje inducido en el rotor es una medida directa de la posición del eje de movimiento. A uno de los devanados del estator se apli-

ca una señal de 10 Vpp, 20 kHz, conocida como RPO (*Reference Phase Output*), y al otro una señal idéntica desfasada 90º, conocida como QPO (*Quadrature Phase Output*). A medida que gira el eje, cambia la posición del rotor y por tanto la magnitud y la fase del voltaje inducido por los devanados RPO y QPO. Procesando estas señales a través de circuitos electrónicos apropiados, se obtiene una indicación de posición absoluta.

Finalmente, el **inductosyn, figura 5.31**, es un transformador variable especialmente diseñado para medir posición lineal en forma directa. Consta de dos pistas conductoras de circuito impreso de cierta longitud (desde 25 cm hasta 36 m) que siguen un patrón regular, similar a un tren de pulsos cuadrados. Una de las pistas, llamada **escala**, es fija, mientras que la otra, llamada **deslizador**, es móvil, se alimenta mediante una tensión AC y se desplaza paralelamente a la primera. La tensión inducida en el deslizador depende de la posición relativa de un circuito respecto al otro, siendo máxima cuando ambos coinciden. El deslizador es movido por el objeto bajo medición, digamos el carro de una máquina herramienta.

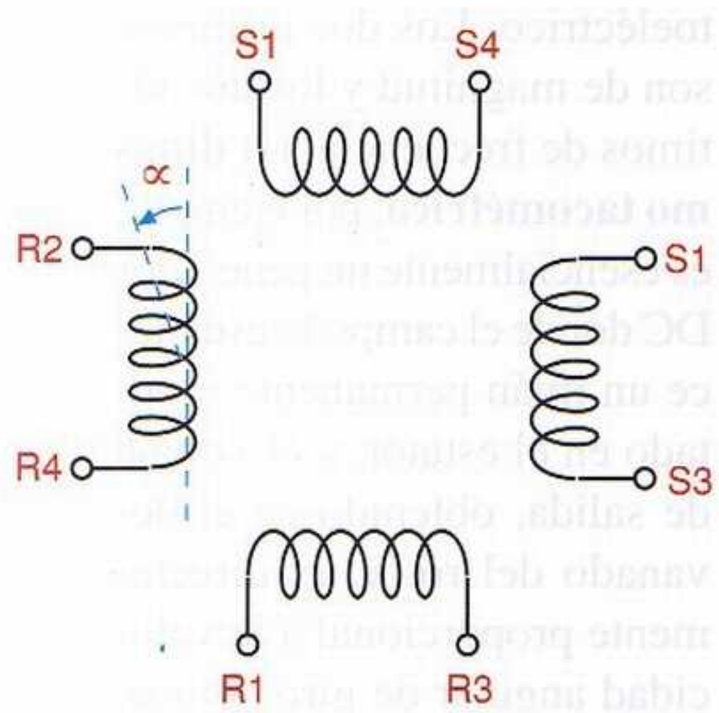


Figura 5.30 Principio de funcionamiento de un resolver de digitalización de fase

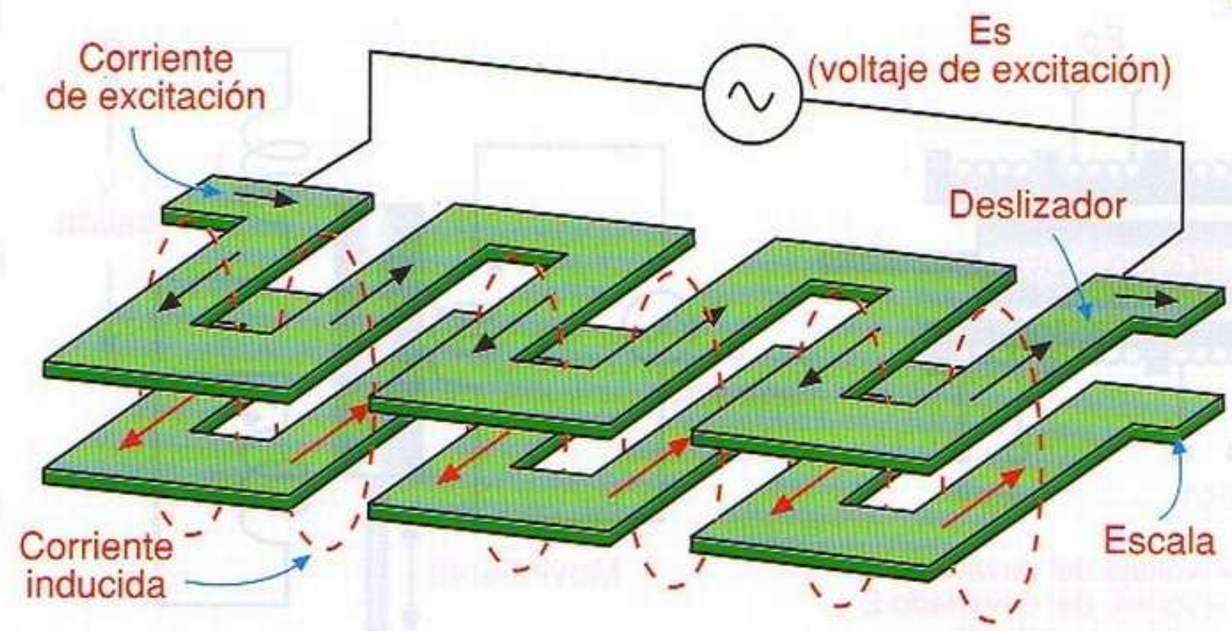
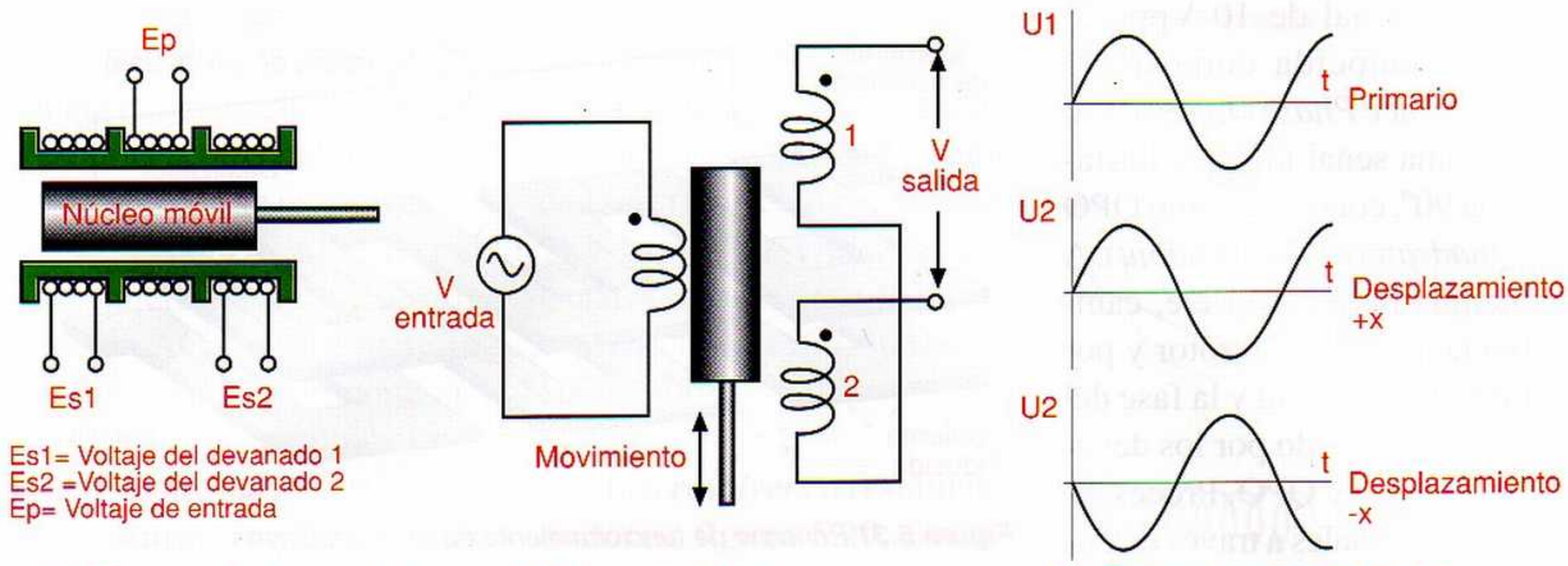


Figura 5.31 Principio de funcionamiento de un Inductosyn

Transformadores diferenciales de variación lineal (LVDTs)

Otra forma muy común de medir desplazamientos lineales, desde menos de 100 mm hasta más de 50 cm, es utilizando un **LVDT** (*Linear Variable Differential Transformer*), **figura 5.32**. Este dispositivo basa su operación en la variación de la inductancia mutua entre un primario y cada uno de dos secundarios cuando se desplaza en su interior un núcleo ferromagnético, accionado por el objeto bajo medición. Al aplicar un voltaje alterno a la bobina primaria, en las bobinas secundarias, conectadas en antiserie, se induce un voltaje cuya magnitud y fase dependen, respectivamente, de la posición del núcleo y de la dirección del movimiento.

Si el núcleo está perfectamente centrado, los voltajes inducidos en ambos secundarios son idénticos y se cancelan. Por tanto, el voltaje de salida neto es cero. A medida que el núcleo se mueve hacia arriba, aumenta el voltaje inducido en el secundario 1 y disminuye el inducido en el secundario 2. Como resultado, el voltaje de salida tiende a estar en fase con el voltaje de entrada. Igualmente, a medida que el núcleo se mueve hacia abajo, aumenta el voltaje inducido en el secundario 2 y disminuye el inducido en el secundario 1. Por tanto, el voltaje de salida tiende a estar en oposición de fase con el voltaje de entrada. Los LVDTs, como veremos en capítulos posteriores, son también muy utilizados como transductores primarios para la medición de fuerza, presión y otras variables mecánicas.



(a) Construcción interna típica. *(b) Esquema eléctrico.* *(c) Formas de onda de salida.*

Figura 5.32 *Transformador diferencial de variación lineal (LVDT)*

Sensores de velocidad. Tacómetros

La medición y el control de velocidad son parte fundamental de muchos servomecanismos industriales. Por esta razón, se han desarrollado varios tipos de sensores, análogos y digitales, que convierten información de velocidad en señales eléctricas equivalentes. Los sensores digitales están generalmente basados en codificadores ópticos o captadores inductivos, mientras que los análogos lo están en los mismos principios de los generadores o dínamos. De cualquier modo, su comportamiento dinámico depende fuertemente del acoplamiento con el eje del movimiento. Este acoplamiento debe ser flexible, pero sin permitir holguras o juego libre.

Los transductores de velocidad reciben el nombre genérico de **tacómetros**. En los mismos, la velocidad puede estar representada por la magnitud o la frecuencia de un voltaje generado. En la **figura 5.33** se muestra como ejemplo el principio de funcionamiento de un **tacómetro de rotor dentado**, la estructura más común de tacométro de frecuencia. El mismo posee un rotor con varios dientes de material ferromagnético, y un estator constituido por un imán permanente con una bobina de alambre enrollada a su alrededor. A medida que gira el rotor, los dientes se aproximan y alejan sucesivamente del imán, induciéndose en la bobina un tren de pulsos de frecuencia proporcional a la velocidad.

Otras estructuras comunes de tacómetros son la dínamo tacométrica, el tacómetro de rotor de metal no magnético, el tacómetro de campo rotatorio de AC y el tacómetro fotoeléctrico. Los dos primeros son de magnitud y los dos últimos de frecuencia. La **dínamo tacométrica**, por ejemplo, es esencialmente un generador DC donde el campo lo establece un imán permanente montado en el estator, y el voltaje de salida, obtenido en el devanado del rotor, es directamente proporcional a la velocidad angular de giro del eje. La polaridad de este voltaje, a su vez, indica la dirección del movimiento. Ω

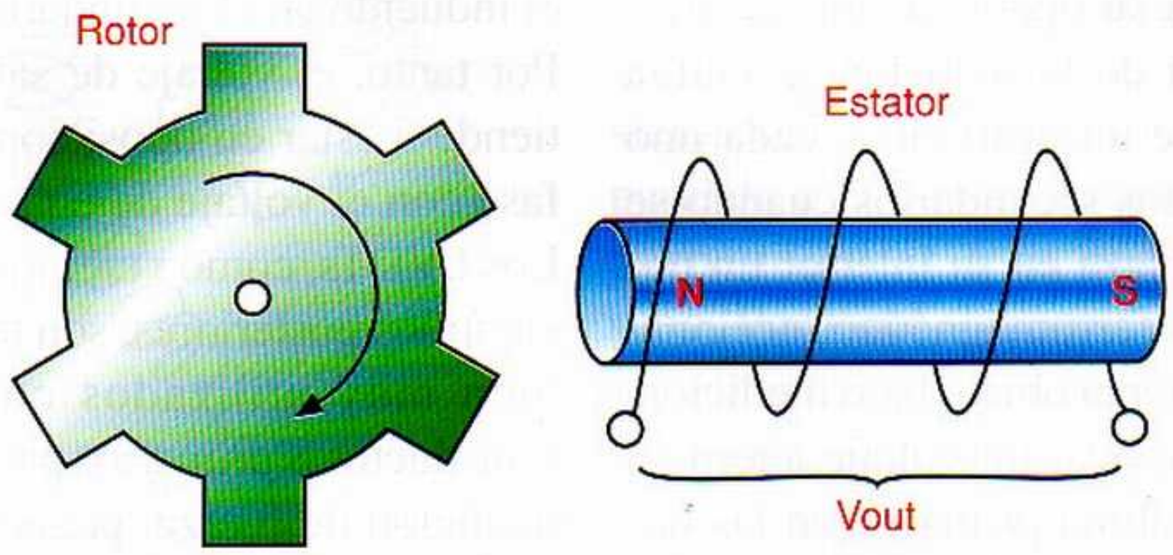


Figura 5.33 *Principio de funcionamiento de un tacómetro de rotor dentado*

Capítulo 6

Sensores de fuerza y otros parámetros mecánicos

En muchos procesos industriales es necesario medir con gran precisión deformaciones, fuerzas, torques, vibraciones, pesos, aceleraciones y otros parámetros mecánicos. Este capítulo examina algunos de los principales sensores utilizados para realizar estas tareas, incluyendo galgas extensiométricas, celdas de carga, acelerómetros y otros.

Introducción

Existen aplicaciones en las cuales se necesita conocer el comportamiento mecánico de elementos y estructuras a lo largo del tiempo o bajo ciertas circunstancias de esfuerzo o tensión. En estos casos se hacen necesarios los sensores de fuerza o deformación. Casos típicos en donde se acude a este tipo de sensores son los análisis de vibración en edificios y puentes o el monitoreo del estado de máquinas rotativas, **figura 6.1**.

Galgas extensiométricas

Estos son elementos que pueden variar su resistencia interna al ser sometidos a esfuerzos mecánicos. Esta propiedad fue descubierta por Lord Kelvin en 1856. Si se considera un hilo metálico de longitud l, sección A y resistividad ρ, su resistencia eléctrica R (en ohms) es

$$R = \frac{\rho\, l}{A}$$

Si se le somete a un esfuerzo en dirección longitudinal, cada una de las tres magnitudes que intervienen en el valor de R experimentan un cambio y por lo tanto R también.

En la **figura 6.2** se muestran diversos tipos de galgas extensiométricas. Las galgas

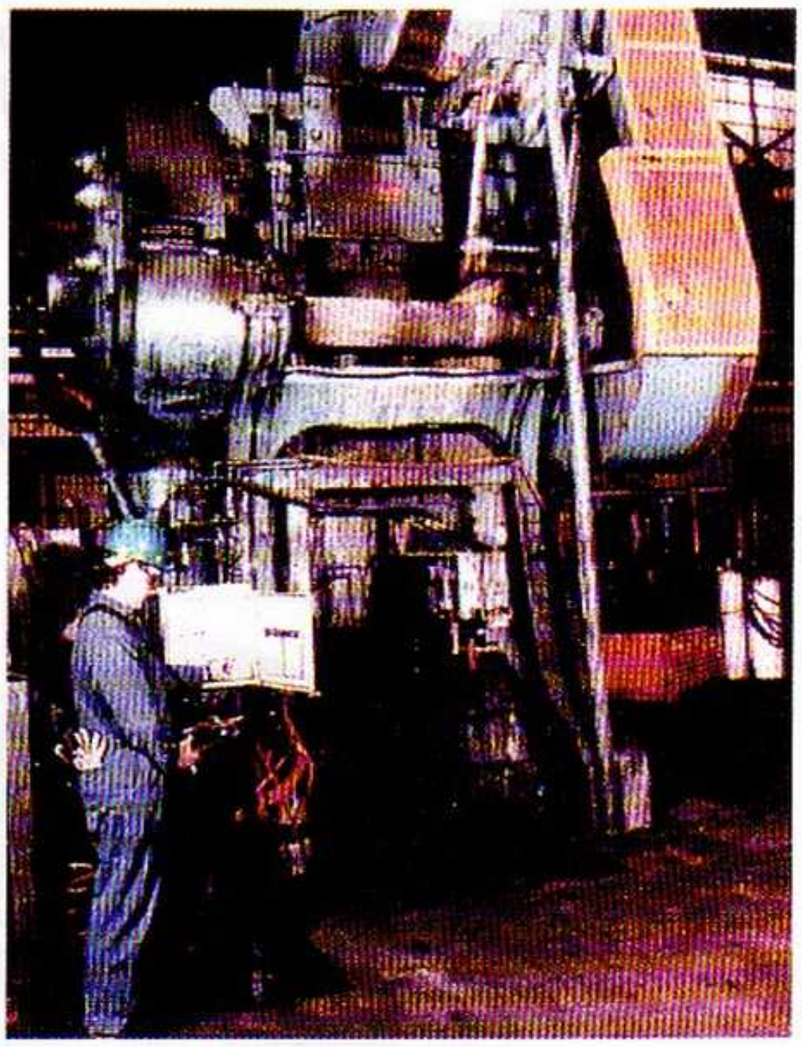


Figura 6.1 En esta máquina rotativa, los sensores de deformación informan si la estructura conserva sus parámetros tolerables de alineamiento.

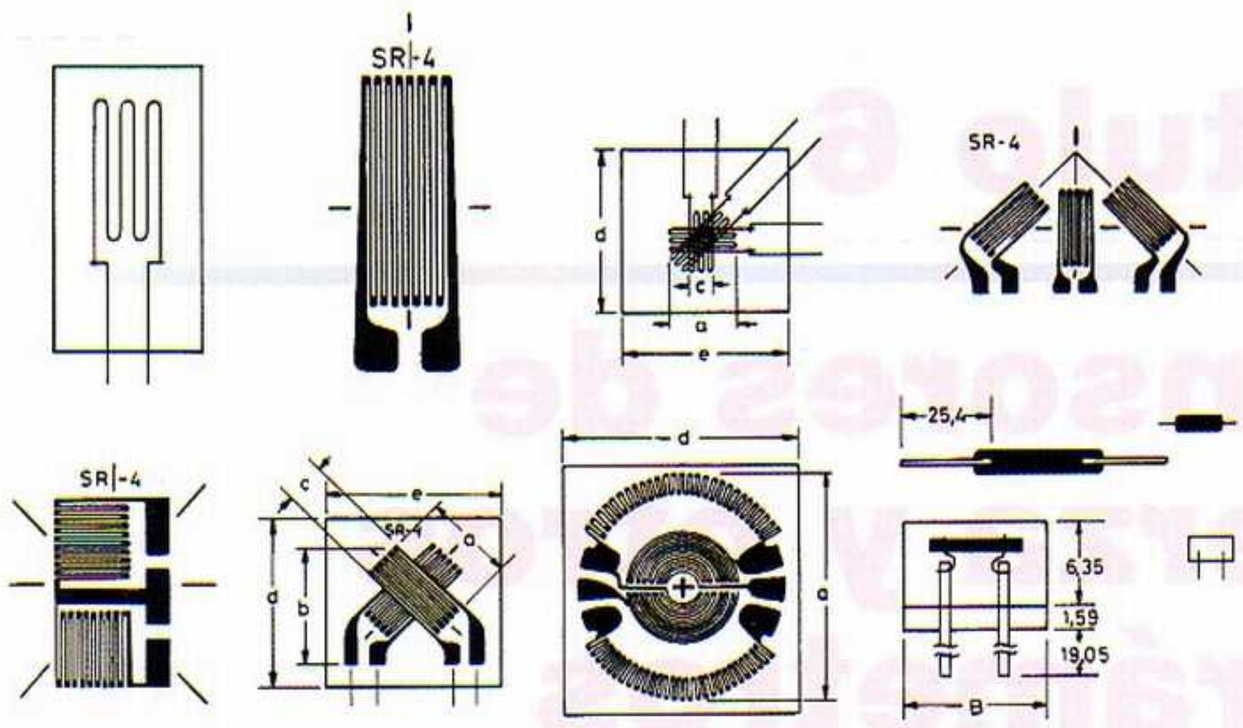


Figura 6.2 Diversos tipos de galgas metálicas y semiconductoras, con y sin soporte.

metálicas con soporte pueden ser de hilo bobinado o plegado con soporte de papel o impresas por fotograbado. Se dispone de gran variedad de configuraciones, adaptadas a diversos tipos de esfuerzos. Hay modelos para diafragma, para medir torsiones, para determinar esfuerzos máximos y mínimos y sus direcciones.

Características técnicas

La galga extensiométrica es uno de los elementos más importantes utilizados para medir fenómenos mecánicos. Analicemos sus principales características técnicas.

1. **Resistencia de la galga.** Se define como la resistencia eléctrica medida entre dos terminales de un metal o áreas de contacto diseñadas para la conexión de cables de medición.
2. **Factor de galga**. Es la sensibilidad de la galga, la cual es proporcional al cambio relativo de la resistencia. Es una medida adimensional.
3. **Referencia de temperatura.** Es la temperatura para la cual las características técnicas son válidas. Los datos técnicos toman como referencia una temperatura de 23 grados centígrados.
4. **Características de temperatura.** Son los cambios que presenta la resistencia de la galga por la temperatura debido a los coeficientes de expansión térmica de los materiales.

Como se examina en el Capítulo 2 de la sección de Actividades, una de las técnicas más utilizadas para realizar mediciones con galgas extensiométricas es incorporándolas en una configuración de puente de Wheatstone. Esta configuración necesita ser ajustada para proporcionar una lectura más fiel del fenómeno real. Este ajuste se llama compensación.

La compensación se puede hacer adicionando al puente una serie de resistencias cuyo valor nominal también está ligado a la temperatura. Estas se disponen de tal manera que contrarresten la variación originada en la galga, lo que constituye una compensación totalmente resistiva y sin elementos electrónicos activos. La compensación de temperatura por medios resistivos garantiza que el puente no se afectará por la temperatura en un estado de carencia de carga, ya que existen diversas razones por las cuales el puente básico puede verse afectado. La primera de ellas es que el comportamiento de las galgas obedece a una curva ligada a la temperatura. Además, el coeficiente de tem-

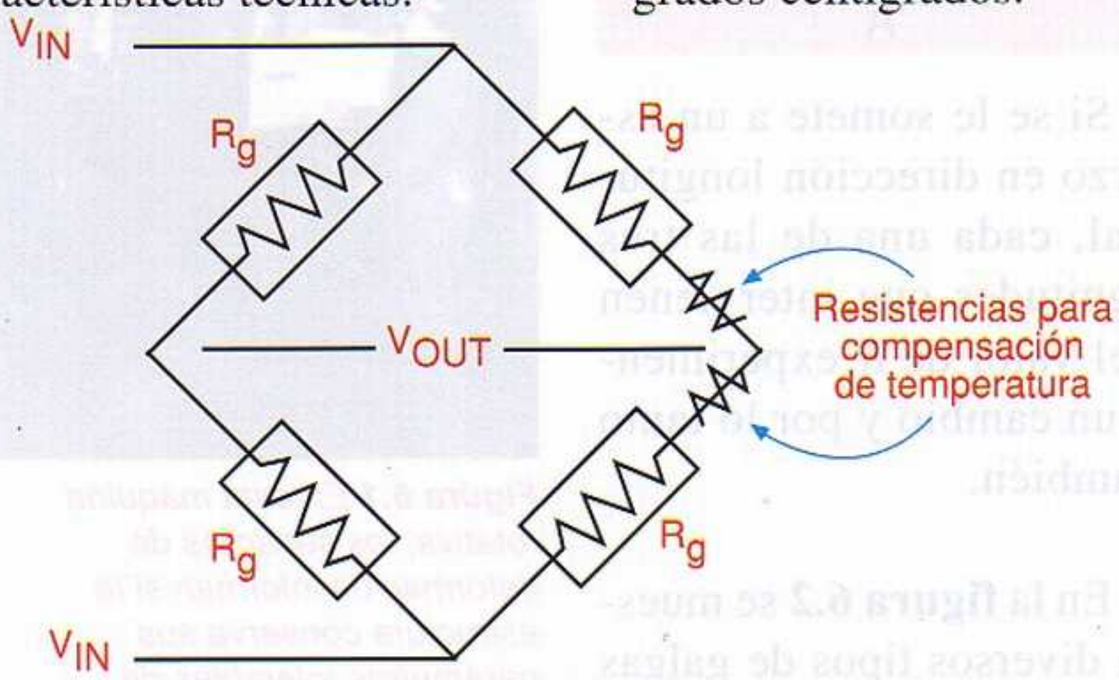


Figura 6.3 Configuración en puente de Wheastone

peratura, aún entre galgas del mismo tipo, nunca es exactamente el mismo.

En la **figura 6.3** se aprecia la configuración de un puente de Wheatstone. La siguiente ecuación describe la relación entre el factor de galga, la elongación y el cambio en la resistencia del sensor.

$$FG = \frac{\Delta R/R}{E}$$

Donde FG = Factor de galga
Delta R = Cambio en la resistencia
R = Resistencia original de la galga
E = Elongación

Galgas extensiométricas de voltaje transverso

Esta es una nueva configuración desarrollada por Motorola, **figura 6.4**. En ella la corriente pasa a través de un semiconductor piezoresistivo entre los pines 1 y 3. La presión que comprime el diafragma causa que el elemento resistivo se doble. Al ocurrir este fenómeno, un campo eléctrico transverso se forma el cual es sensado entre los pines 2 y 4, que se ubican en el punto medio del resistor.

La principal ventaja de este tipo de galga es que sólo usa un elemento, razón por la cual no es tan alineal como lo puede ser un puente de Wheatstone y no necesita de procedimientos de compensación y calibración.

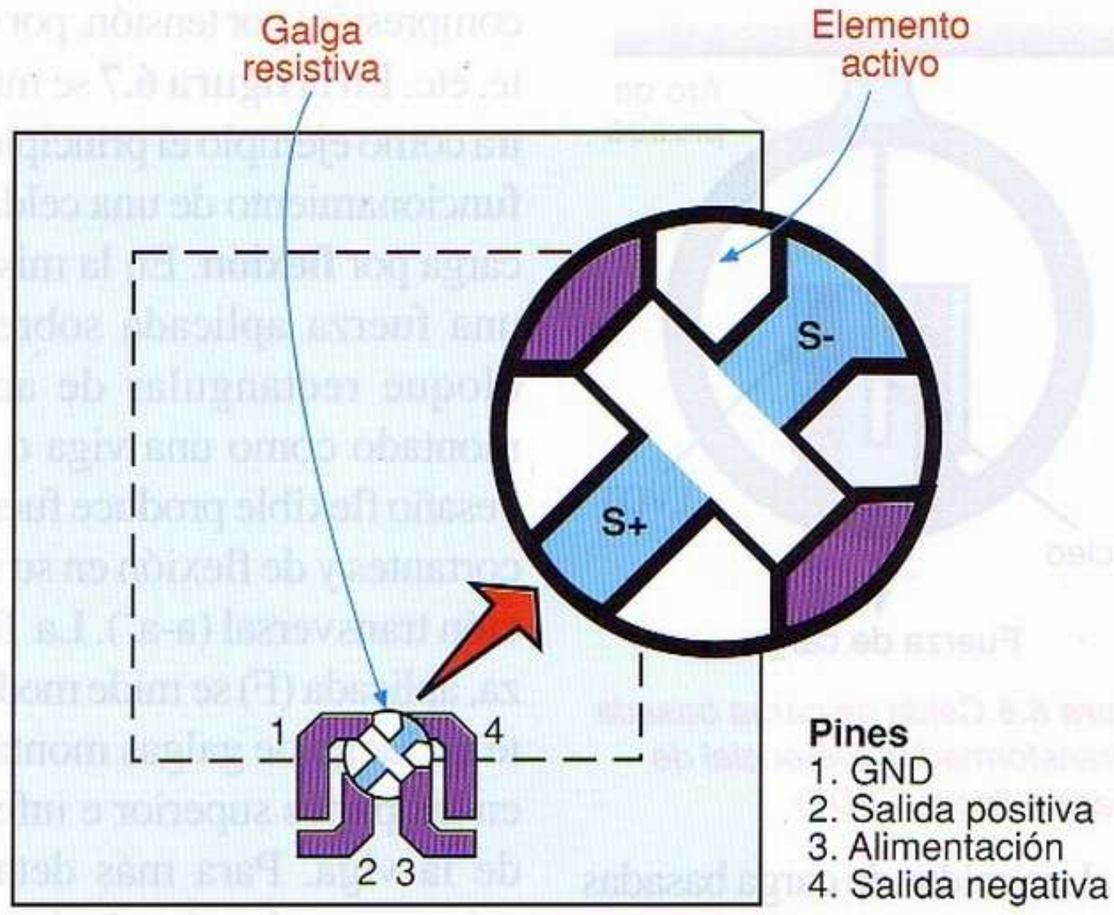


Figura 6.4 Galga extensiométrica de voltaje transversal

Celdas de carga

Las celdas de carga, **figura 6.5,** son transductores que convierten una acción de carga o peso en una señal eléctrica análoga. Esta conversión es posible gracias a la deformación física de una serie de galgas conectadas en configuración de puente de Wheatstone y dispuestas estratégicamente en el cuerpo de la celda de carga. El peso aplicado a una celda de carga, ya sea a través de tensión o compresión, produce una deflexión de la viga y una deformación de las galgas, lo cual se refleja en un cambio en la resistencia eléctrica de las mismas proporcional a la carga.

Actualmente, la mayoría de celdas de carga están basadas en el uso de galgas extensiométricas como sensores de deformación. Sin embargo, también se dispone de celdas de carga basadas en transformadores diferenciales de variación lineal (LVDTs) y otros tipos de sensores de pequeños desplazamientos. En la **figura 6.6** se muestra un ejemplo. En este caso, la celda está formada por una pieza cilíndrica solidaria al eje de un LVDT que se deforma por acción de la fuerza de carga ejercida sobre ella. Esta deformación provoca el movimiento del núcleo del transformador y por tanto la producción de una señal proporcional.

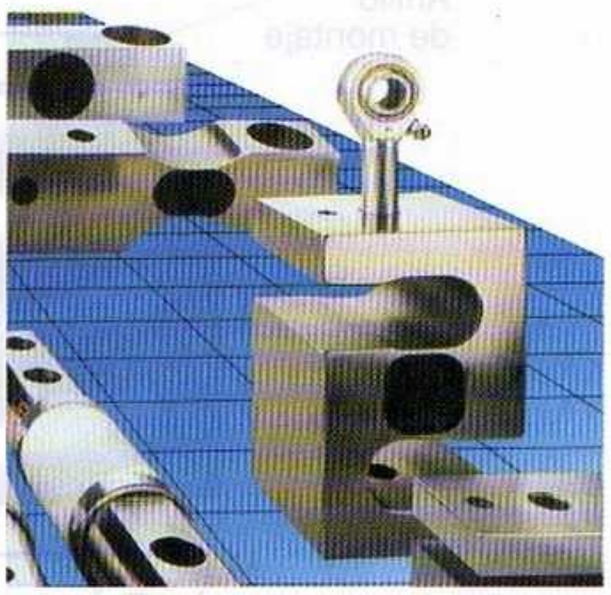


Figura 6.5 Las celdas de carga se ofrecen en una gran variedad de formas y configuraciones.

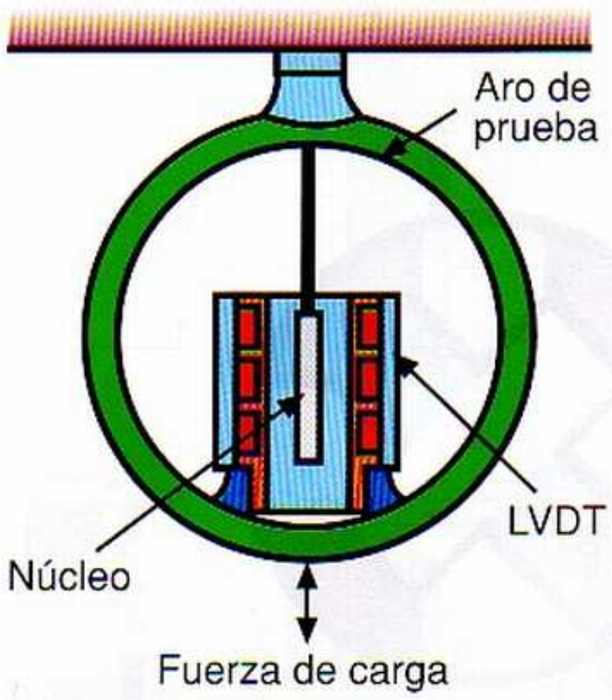


Figura 6.6 Celda de carga basada en transformador diferencial de variación lineal (LVDT)

Las celdas de carga basadas en galgas pueden ser de varios tipos, dependiendo de la forma como realizan la medición de fuerza, es decir por flexión, por compresión, por tensión, por corte, etc. En la **figura 6.7** se muestra como ejemplo el principio de funcionamiento de una celda de carga por **flexión**. En la misma, una fuerza aplicada sobre un bloque rectangular de acero montado como una viga o travesaño flexible produce fuerzas cortantes y de flexión en su sección transversal (a-a'). La fuerza, aplicada (F) se mide mediante un juego de galgas montadas en las partes superior e inferior de la viga. Para más detalles sobre este y los demás tipos de celdas mencionadas, se remite al **Capítulo 2** de la sección de **Actividades.**

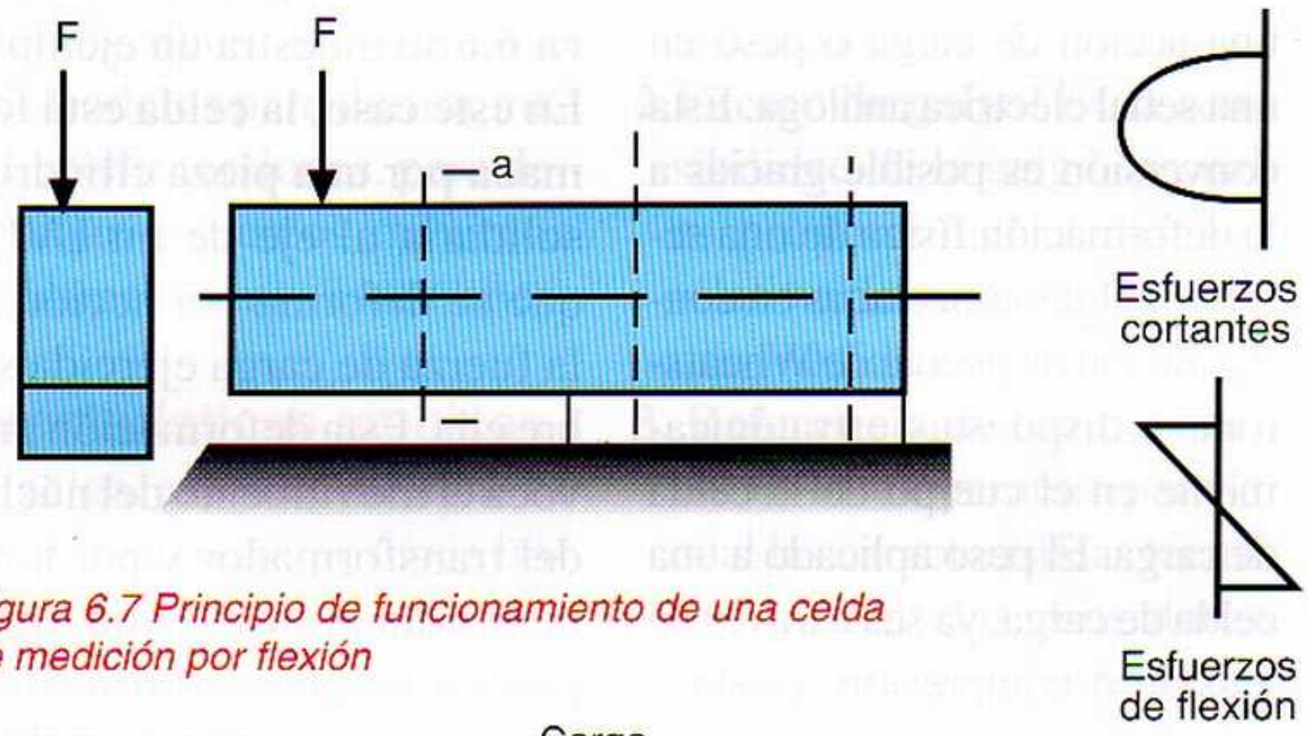


Figura 6.7 Principio de funcionamiento de una celda de medición por flexión

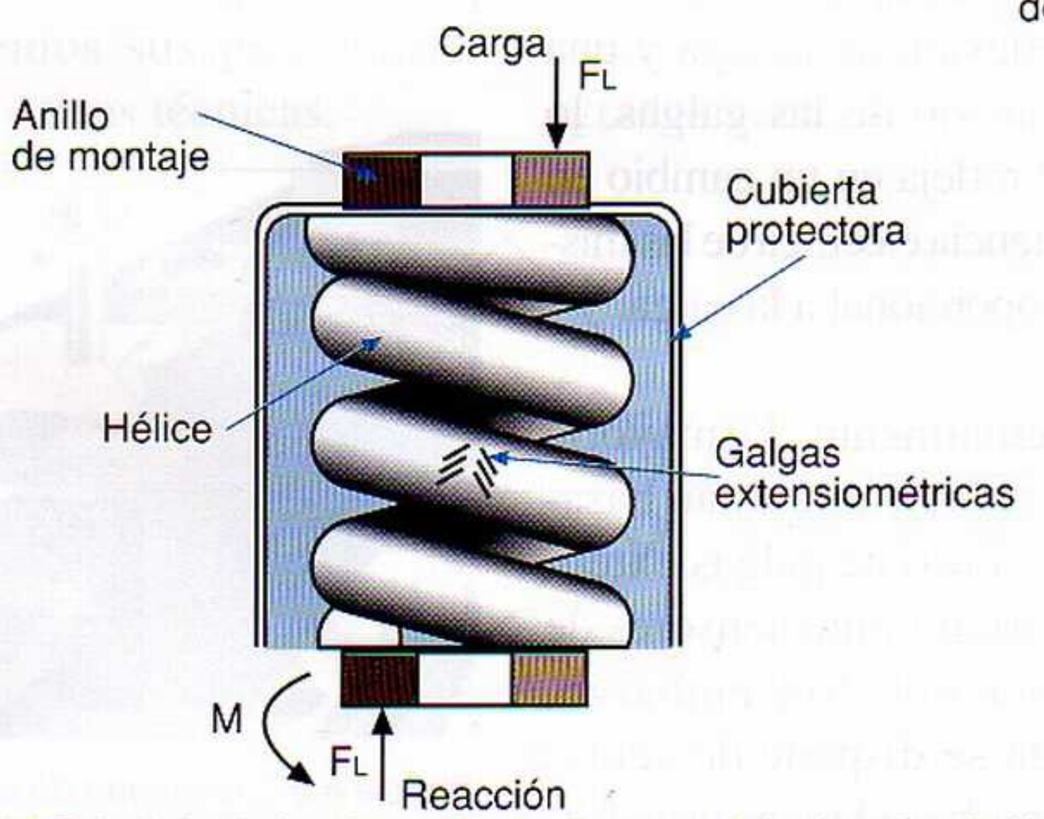


Figura 6.8 Principio de funcionamiento de una celda de carga helicoidal de resorte

Otro tipo de celda muy popular es la llamada **celda helicoidal**, **figura 6.8**, utilizada principalmente en parejas para medir cargas de paletizado sobre plataformas a medida que son levantadas por montacargas, así como para crear balanzas portátiles. La misma utiliza un resorte que convierte la fuerza de carga vertical (F_L) aplicada en un par o momento de torsión (M), el cual viaja a través del alambre y es convertido en una fuerza de reacción lineal (F_R). En cualquier par de puntos diametralmente opuestos, la suma de los momentos de reacción es una constante, proporcional a la fuerza aplicada. Esta constante se deriva midiendo las fuerzas de compresión y de torsión en el resorte mediante un par de galgas.

Las celdas de carga basadas en galgas extensiométricas se identifican mediante varios parámetros, siendo los más importantes la capacidad o cantidad de fuerza que pueden soportar, la señal característica vs excitación, las carga mínima, la precisión, el voltaje de excitación, la linealidad, la histéresis y la repetibilidad. Estos conceptos, que determinan la idoneidad de una celda de carga para un trabajo determinado, así como otros aspectos prácticos relacionados con el uso de las celdas de carga, se examinan en el **Capítulo 2** de la sección de **Actividades.**

Acelerómetros

Los **acelerómetros, figura 6.9**, son dispositivos que miden aceleraciones, es decir ratas de cambio de velocidad, utilizando como referencia una cantidad conocida de masa, llamada **masa sísmica**, la cual se encuentra en unión mecánica con el objeto medido. Esta masa actúa como un péndulo, respondiendo a la aceleración del objeto y causando, por la segunda ley de Newton, una fuerza resultante de la forma **F=m·a** que puede ser detectada, por ejemplo, mediante un juego de galgas. Puesto que la masa sísmica (**m**) es constante, la fuerza medida por el tranductor es una medida indirecta de la aceleración sufrida por el objeto.

En la **figura 6.10** se muestra como ejemplo la estructura de un acelerómetro basado en una galga. La masa sísmica se sujeta al armazón del dispositivo mediante una unión elástica de baja resistencia, equivalente a un resorte muy duro. Cuando el objeto bajo medición se acelera, el armazón transmite una fuerza a través de la unión elástica, lo que permite que la masa sísmica se desplace ligeramente a la izquierda. La tensión en la unión elástica produce un cambio de resistencia en la galga, el cual puede relacionarse fácilmente con la fuerza aplicada y, por tanto, con la aceleración experimentada por el objeto.

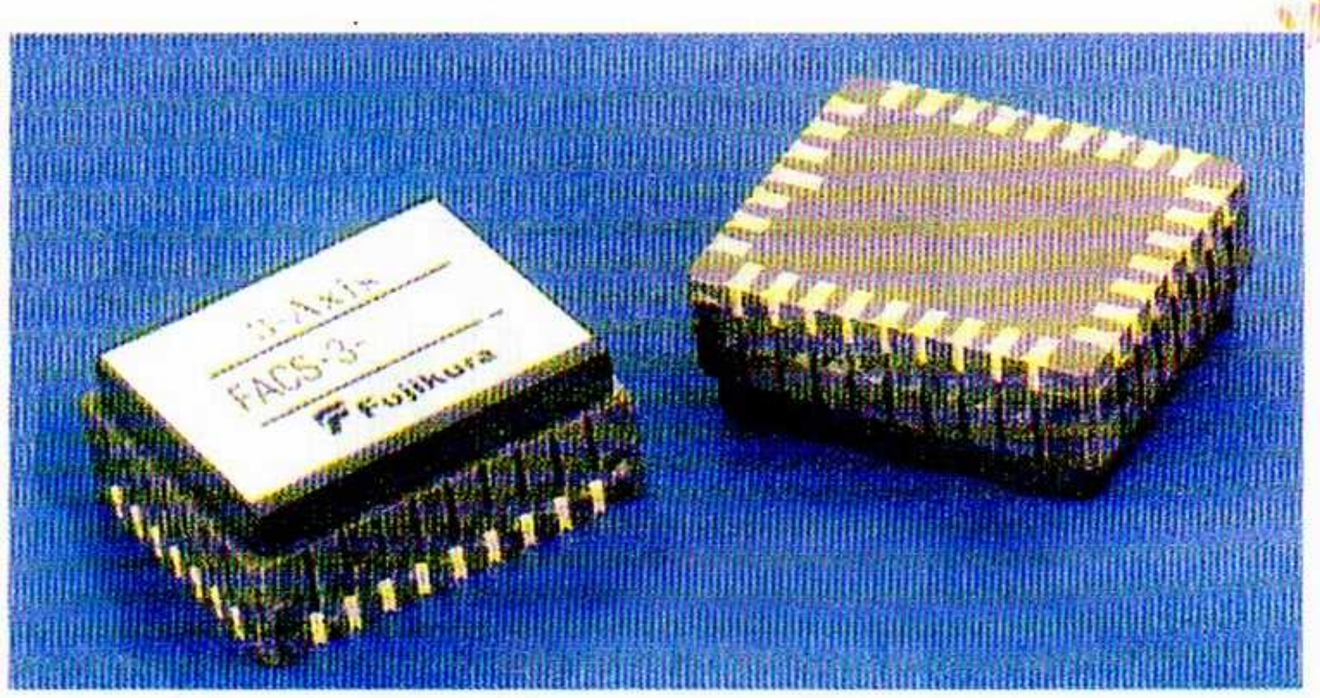


*Figura 6.9. Los **acelerómetros** son ampliamente utilizados en sistemas de monitoreo de vibración de máquinas, sistemas de control de tracción y otras aplicaciones industriales y no industriales donde se mueven grandes masas a grandes velocidades. El acelerómetro mostrado en la fotografía, fabricado por Fujikura mediante técnicas de micromecanizado, es piezoresistivo, mide apenas 11.4mm x 14.0mm x 5.5mm, y detecta simultáneamente aceleraciones en tres ejes.*

Aparte del enfoque por galga, hay otras técnicas de detección de fuerza empleadas en el diseño de los acelerómetros. En la **figura 6.11**, por ejemplo, se muestra un acelerómetro basado en un **LVDT**. En este caso, el núcleo del transformador actúa como masa sísmica, obteniéndose una medición indirecta de la aceleración a base de medir el desplazamiento del mismo. También existen acelerómetros piezoeléctricos, piezorresistivos, capacitivos, magnetohidrodinámicos, micromecanizados, y de otras tecnologías.

Los acelerómetros **piezoeléctricos**, basados en las propiedades de materiales como

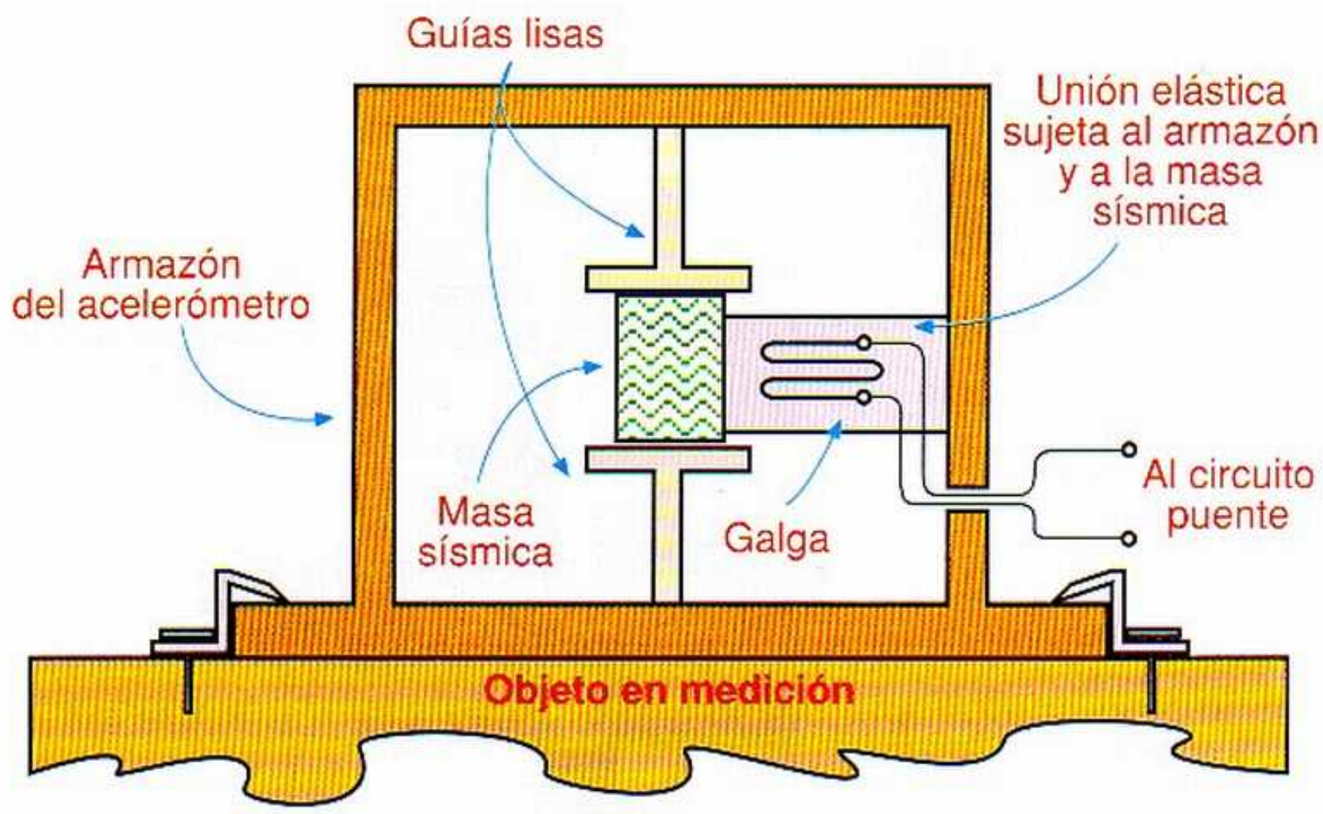


Figura 6.10. Estructura de un acelerómetro con galga. El armazón del dispositivo debe sujetarse firmemente al objeto medido. Las guías permiten el movimiento de la masa sísmica en la dirección izquierda/derecha, pero lo restringen en las direcciones arriba/abajo y adentro/afuera,

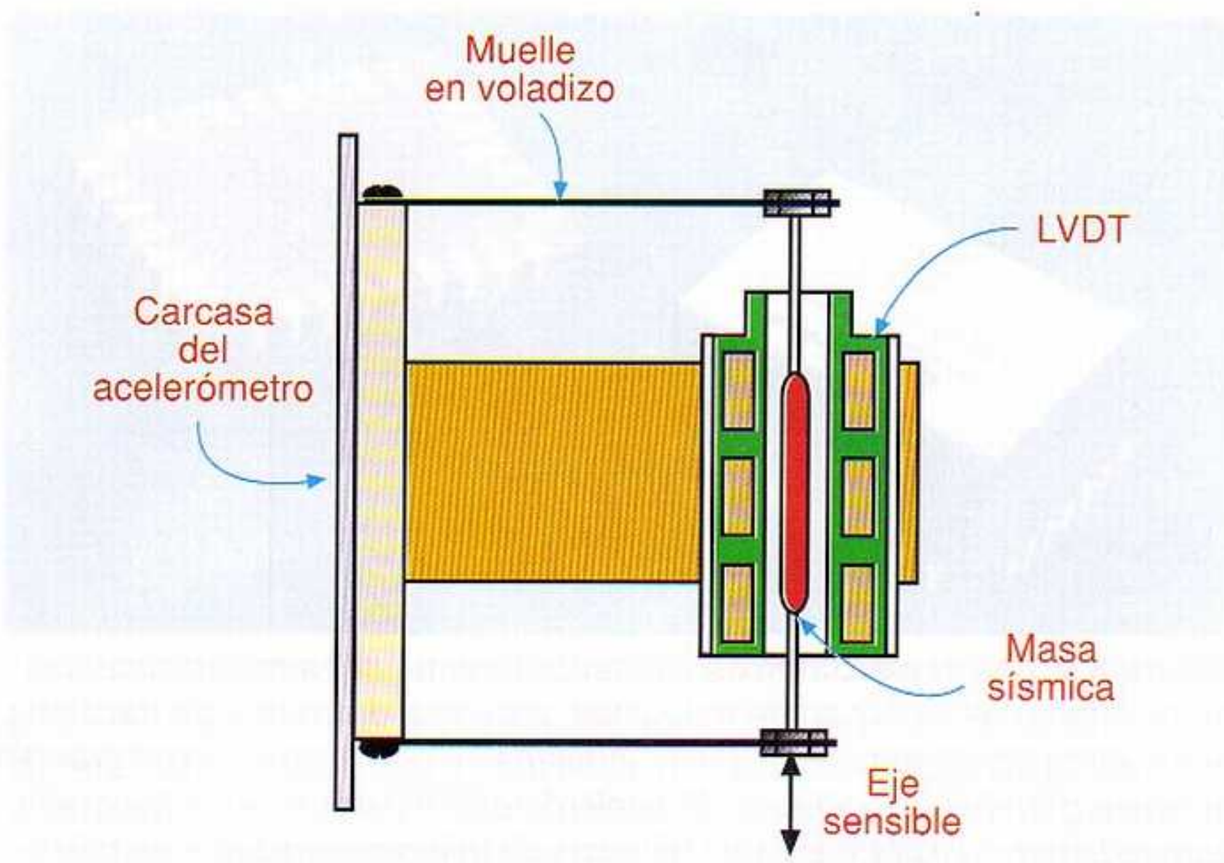


Figura 6.11 Estructura de un acelerómetro con LVDT

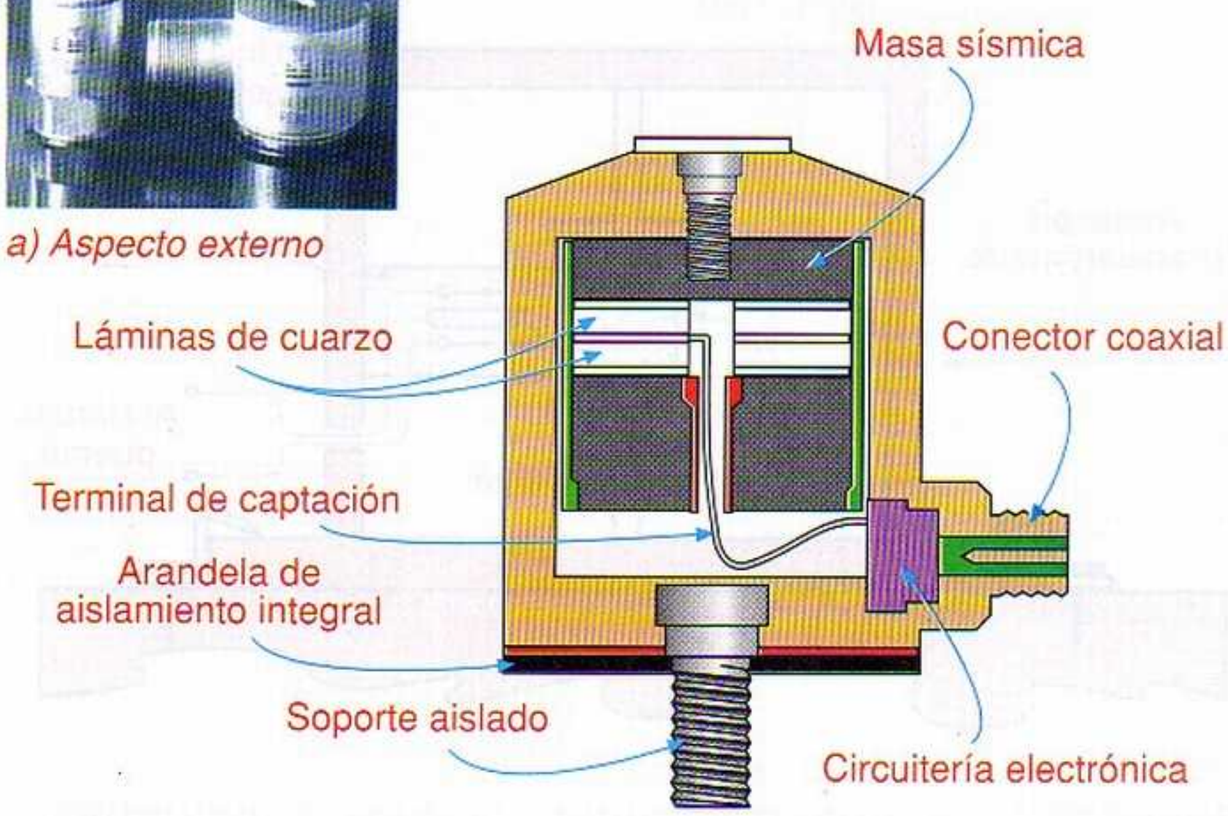
el cuarzo, el niobato de litio y el titanato zirconado de plomo (PZT) de producir una salida eléctrica proporcional a la fuerza aplicada, son probablemente los más comunes. Los mismos ofrecen un bajo costo, un amplio rango dinámico y una excelente confiabilidad a largo plazo. Además, traen circuitos de amplificación, acondicionamiento e interface incorporados, los cuales reducen costos de implementación y simplifican el diseño de aplicaciones, **figura 6.12.**

Actualmente son también muy populares los acelerómetros **piezorresistivos** de silicio, caracterizados principalmente por su reducido tamaño. En la **figura 6.13** se muestra como ejemplo un acelerómetro de tres ejes representativo. El mismo consta de una capa de vidrio, que actúa como masa sísmica, emparedada entre dos capas de silicio. Sobre la superficie superior de la primera capa se forman tres juegos de puentes de Wheatstone, cada uno constituido por cuatro piezorresistores. El dorso de la misma capa es un delgado diafragma de silicio.

La tercera capa (pedestal) limita el recorrido de la masa sísmica, evitando que el diafragma se deforme por una aceleración excesiva. También sirve como base para la fijación de la unidad. En este caso, cuando la aceleración se aplica a lo largo del eje X o Y, la inercia causa que la masa sísmica se incline oblicuamente, **figura 6.13c**, mientras que si se aplica a lo largo del eje Z causa que se mueva hacia abajo, **figura 6.13d**. Como resultado, el diafragma responde al movimiento de la masa sísmica deflectándose.

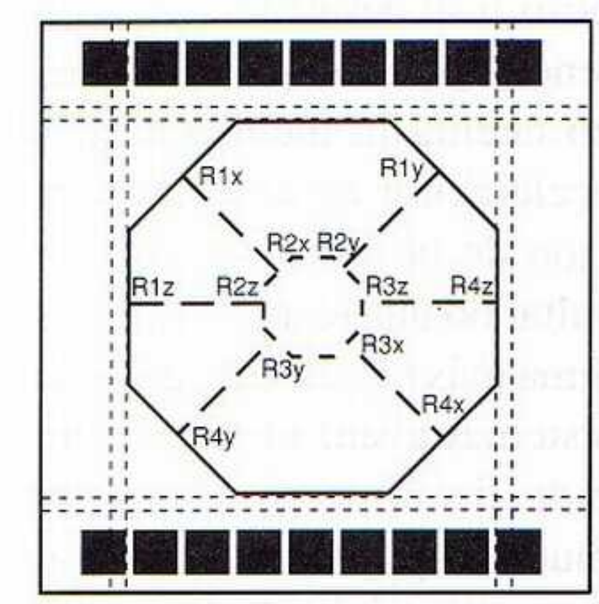
Esta deflexión causa un esfuerzo de compresión o de tensión en cada piezorresistor, lo cual provoca que disminuya o aumente, respectivamente, su valor de resistencia y se produzca un voltaje de salida para cada eje proporcional a la aceleración ejercida en dirección del mismo.

a) Aspecto externo

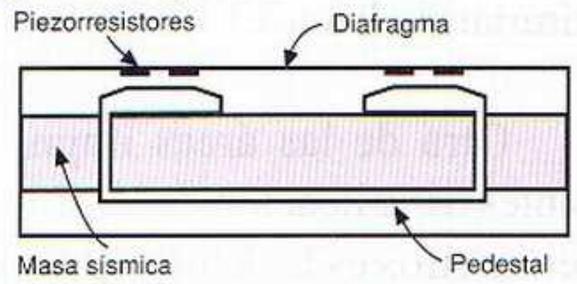


b) Estructura interna

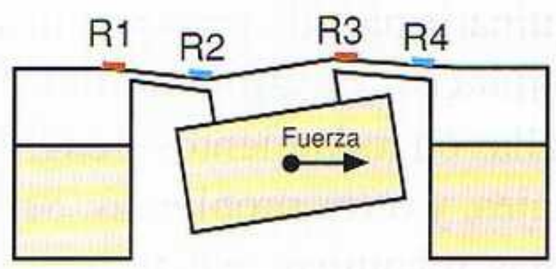
Figura 6.12 Acelerómetro piezoeléctrico con electrónica incorporada. El modelo mostrado tiene una sensibilidad de 100mV/g



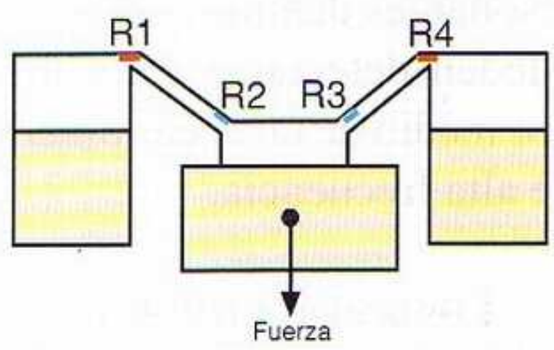
a) Vista superior.



b) Sección transversal.



c) Aceleración a lo largo del eje X o Y.



d) Aceleración a lo largo del eje Z.

Figura 6.13 *Estructura y funcionamiento de un acelerómetro piezorresistivo de silicio de tres ejes. La masa sísmica se comporta como un péndulo, respondiendo a la aceleración y causando la deflexión del diafragma.*

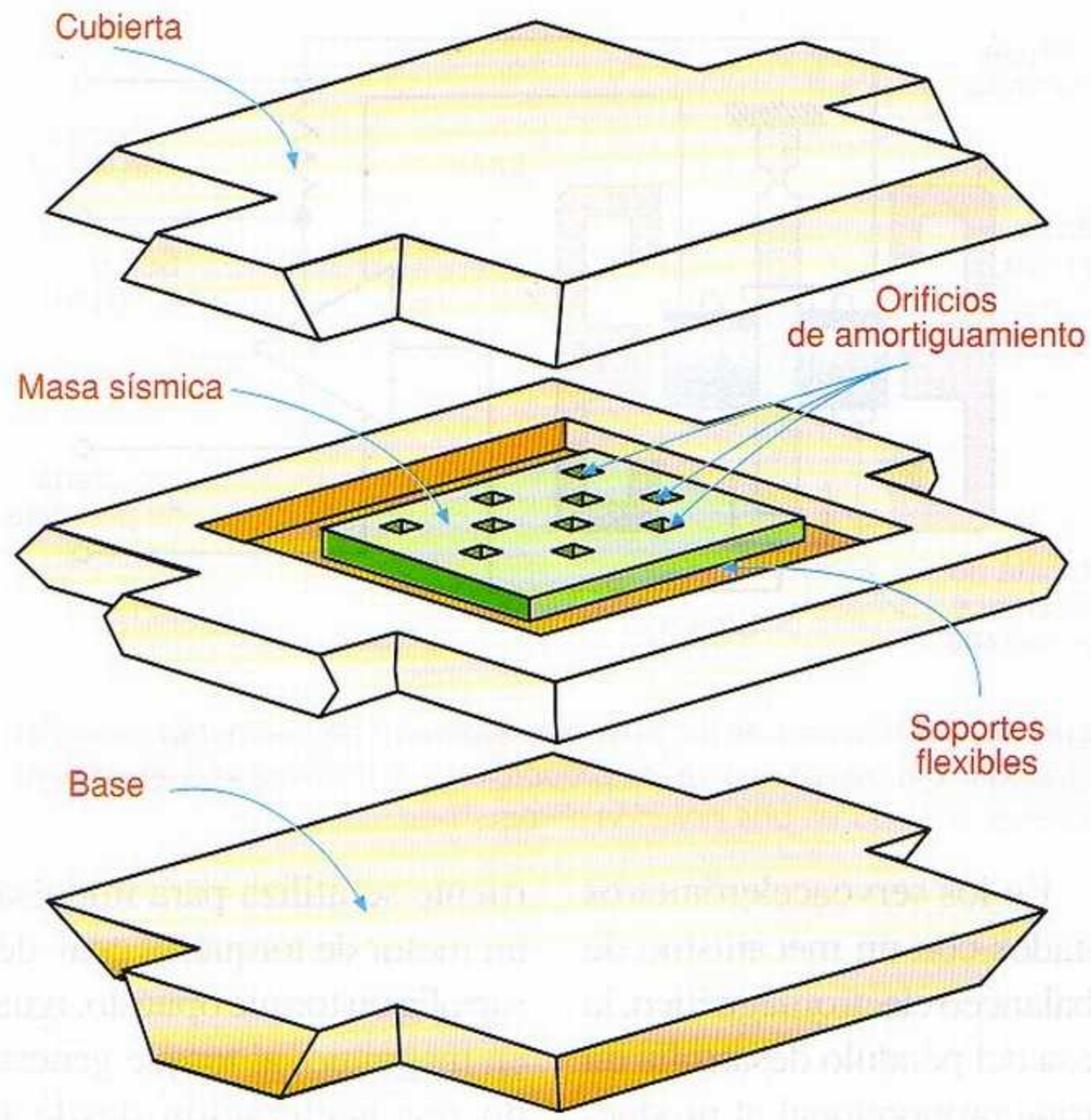


Figura 6.14 *Vista explorada de un acelerómetro de capacitancia variable mostrando sus elementos primarios*

También se dispone de acelerómetros **capacitivos**, formados por tres placas planas paralelas de silicio separadas por aire, **figura 6.14**. Las placas superior e inferior son fijas, y constituyen los electrodos de un condensador de láminas paralelas. La placa central, que pende de dos brazos delgados y flexibles en voladizo, constituye la masa sísmica, la cual es sensible a la aceleración en la dirección perpendicular de las placas. La masa sísmica posee una serie de orificios a través de los cuales se hace fluir un gas de amortiguamiento. Este tipo de acelerómetros proveen mejores características operativas que los sensores antes discutidos, pero son más costosos.

Finalmente, los acelerómetros **servo** o de **balance de fuerzas**, **figura 6.15**, son sensores que producen una salida proporcional a la fuerza requerida para retornar o rebalancear físicamente la masa sísmica y mantenerla en la posición de equilibrio. Para ello, utilizan realimentación. Pueden ser de geometría lineal, como la de un parlante, o pendular, como la de un instrumento de bobina móvil.

En estos últimos, que son los más comunes, la masa sísmica está inmersa en un campo magnético permanente y posee una bobina devanada a su alrededor. La fuerza de restauración se proporciona impulsando una corriente a través de esta bobina, lo cual provoca su movimiento y, por tanto, el de la masa.

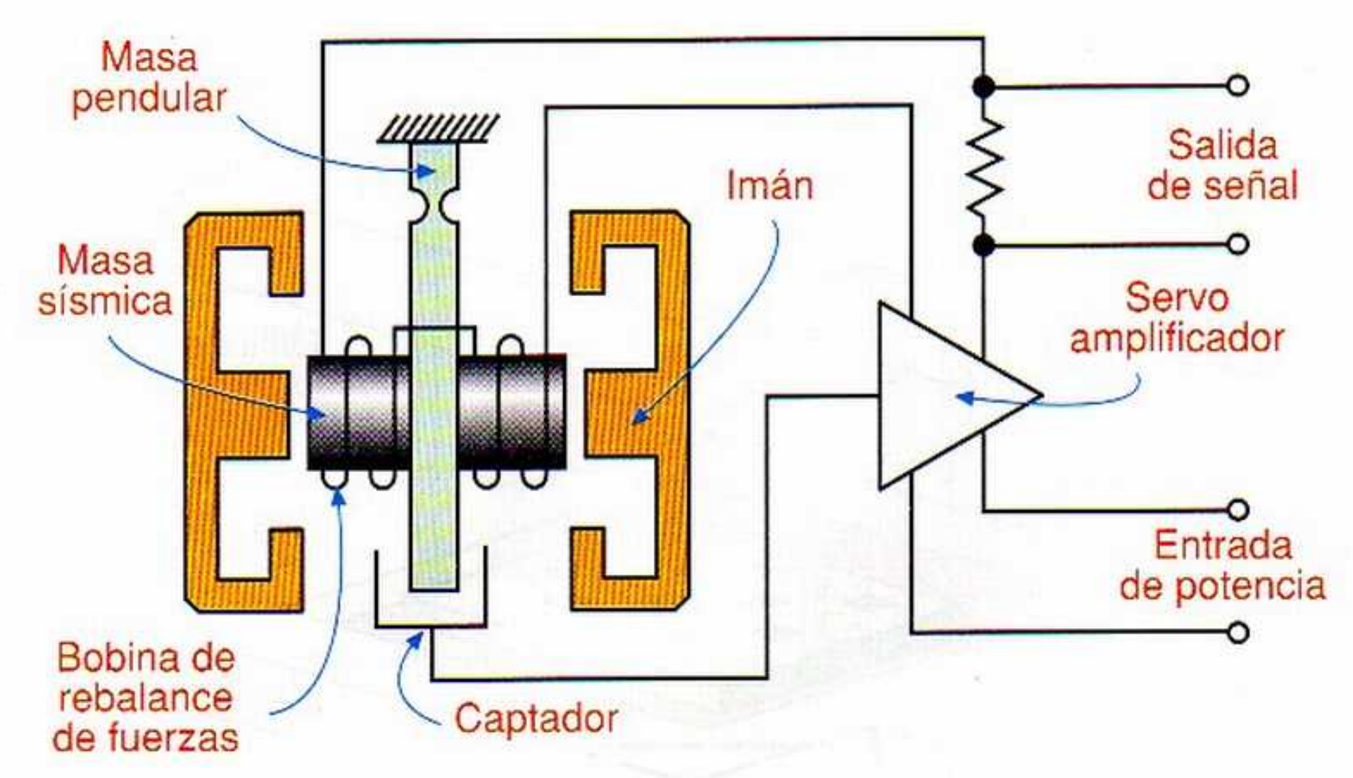


Figura 6.15 Estructura de un servo acelerómetro de geometría pendular. El dispositivo produce una salida proporcional a la fuerza requerida para mantener la masa en una posición de equilibrio.

En los servoacelerómetros dotados con un mecanismo de rebalanceo electromagnético, la masa del péndulo desarrolla un torque proporcional al producto de la masa de prueba por la aceleración aplicada. El movimiento de la masa se detecta mediante sensores de posición, típicamente capacitivos, los cuales entregan una señal de error que dispara un servoamplificador, produciéndose una corriente de realimentación proporcional a la fuerza aplicada y, por tanto, a la aceleración. Esta corriente se utiliza para impulsar un motor de torque, el cual desarrolla un torque opuesto, igual en magnitud, al torque generado por aceleración desde la masa pendular.

Industrialmente, los acelerómetros son muy utilizados en sistemas de control de seguimiento refinados para suministrar una señal de realimentación adicional al comparador de error. A medida que el sistema de seguimiento se mueve de su posición de reposo o se desacelera para detenerse, el comparador toma en cuenta la medición de la aceleración en la determinación de la señal de error, resultando una respuesta del sistema más rápida y estable. Los sistemas avanzados de operación de motores, así como muchas aplicaciones militares y aeroespaciales, hacen un uso similar de los acelerómetros.

Figura 6.16 Sensor de vibración incorporado a un servomecanismo

Otra de las áreas importantes de aplicación de los acelerómetros es la detección y el análisis de vibraciones de maquinaria para diagnosticar desbalances, desalineamientos, fallas en rodamientos y engranajes, y otros problemas. Muchas máquinas están sometidas a vibraciones mecánicas resonantes dañinas, las cuales pueden detectarse y medirse por medio de un acelerómetro de alta frecuencia.

Los acelerómetros diseñados específicamente para el analisis de vibraciones se conocen generalmente como **vibrómetros**, **figura 6.16**. El monitoreo de la condición de máquinas rotatorias utilizando análisis vibracional, se ha convertido en una práctica de mantenimiento predictivo estándar.

La resolución, el rango y otros parámetros de los acelerómetros se especifican usualmente en unidades de gravedad (**g**), por ejemplo 80μg, siendo **g=9.8 m/s²**. Ω

Capítulo 7

Transductores de presión y otros parámetros de fluidos

Los sensores de presión, nivel y flujo son ampliamente utilizados en todo tipo de procesos industriales y no industriales basados en el manejo, control y monitoreo de fluidos como agua, aceites, combustibles, químicos, sangre, gases, etc. En este capítulo se repasan los conceptos básicos de la mecánica de los fluidos y examinan las características generales de los principales tipos de transductores utilizados para la medición de estos parámetros.

Generalidades

Los **transductores de fluidos** son ampliamente utilizados en el mundo industrial para medir presión, nivel y flujo, tres parámetros característicos de líquidos, gases y otras sustancias que fluyen. Usted los encontrará, por ejemplo, en las industrias procesadoras de alimentos, medicamentos y productos químicos, los sistemas hidráulicos de líneas de producción automatizadas, y a lo largo de toda la cadena de producción petrolífera, desde la exploración hasta la distribución, pasando por la perforación, el transporte, la refinación, etc, **figura 7.1**.

Los sensores de fluidos tienen también usos automotrices, médicos, ambientales, científicos, didácticos, y de otros tipos. A continuación examinaremos cómo funcionan y se caracterizan los principales tipos de sensores utilizados en los procesos industriales para medir presión, nivel y flujo. Sin embargo, antes de entrar en materia, es conveniente recordar algunos conceptos físicos básicos relacionados con el comportamiento dinámico y estático de los fluidos, como el Principio de Arquímedes, la Ley de Pascal, el Teorema de Bernoulli, etc.

Figura 7.1 Los sensores de fluidos son ampliamente utilizados en aplicaciones industriales y no industriales para medir la presión ejercida por líquidos, gases y otros compuestos, así como su nivel o altura y su velocidad de flujo.

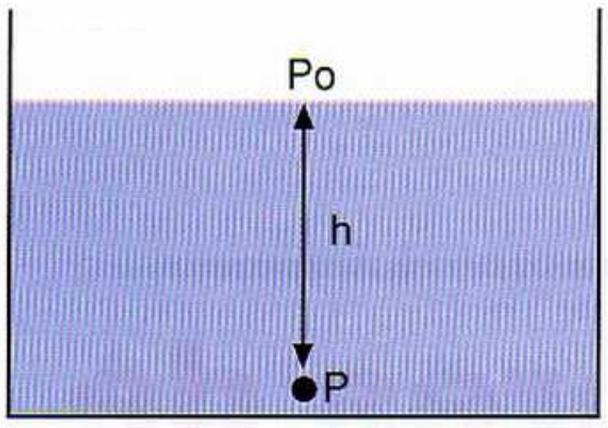


Figura 7.2 Concepto de presión

$$P = Po + mgh/V = Po + \partial gh$$

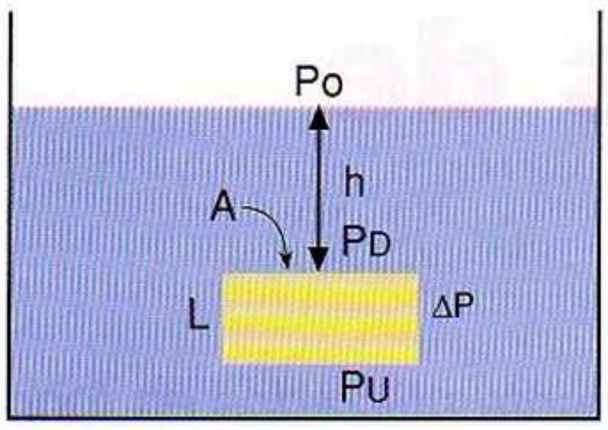


Figura 7.3 El principio de Arquímedes

$$\Delta P = PU\text{-}PD = \partial gL = W/A$$

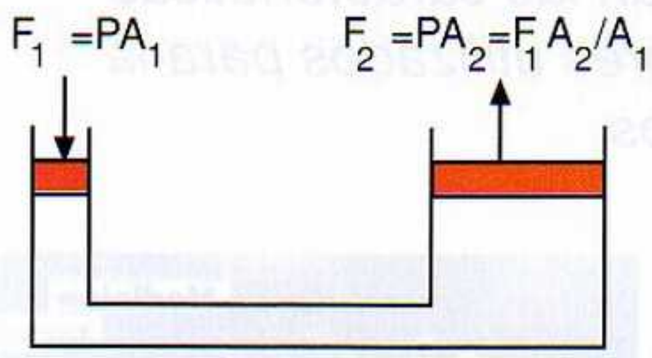
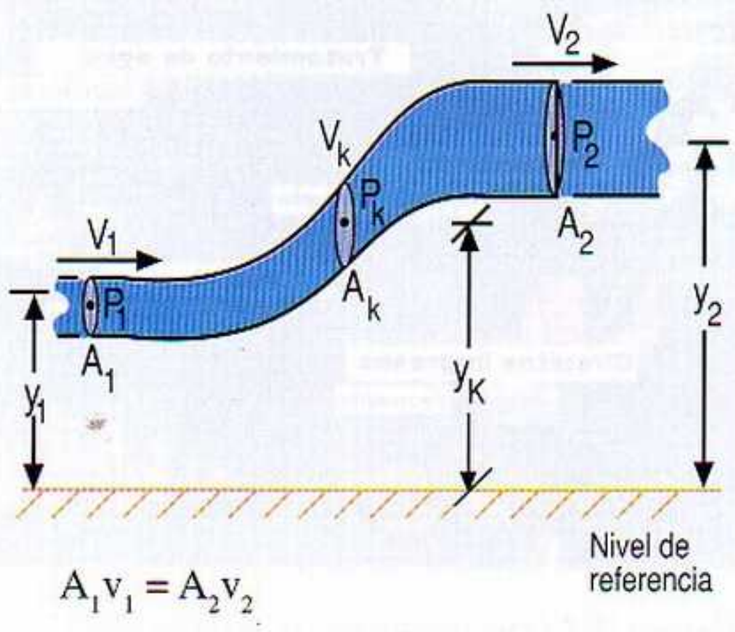


Figura 7.4 La ley de Pascal



$$P_1+\partial gy_1+\partial v_1^2/2= P_2+\partial gy_2+\partial v_2^2/2$$

Figura 7.5 El Teorema de Bernoulli y la ecuación de continiudad

Conceptos básicos de mecánica de fluidos

Los fluidos son la materia prima, el producto final o un subproducto de muchos procesos, así como un medio para transferir energía de un sitio a otro. En todos estos casos se requiere su monitoreo y control constante, el cual se realiza, básicamente, a través de mediciones de presión, nivel o flujo utilizando los sensores apropiados a cada situación.

La **presión** (**P**), en particular, se define como la fuerza por unidad de área (F/A) que actúa perpendicularmente a la superficie de un fluido. En el caso de un fluido en reposo, confinado en un recipiente como se muestra en la **figura 7.2**, la presión en cualquier punto interno del mismo (**P**) depende del peso por unidad de volumen del líquido (**mg/V**), la distancia del punto a la superficie (**h**) y la presión externa aplicada a esta última (**Po**).

La unidad de medida de la presión en el sistema SI es el **Pascal** (Pa), equivalente a 1.0 N/m^2. En la práctica se utilizan también otras unidades, **Tabla 7.1**. Asimismo, la presión en un punto puede ser absoluta, diferencial o manométrica dependiendo de la presión tomada como referencia (Po). Las mediciones de **presión absoluta** (psia) toman como referencia el vacío, las de **presión diferencial** (psid) la presión en un punto arbitrario y las de **presión manométrica** (psig) la presión atmosférica ambiente.

En un fluido confinado, independientemente de su cantidad, todos los puntos a la misma profundidad están sometidos a la misma presión. Esta observación es muy útil, por ejemplo, para determinar la altura o **nivel** alcanzado por una columna de líquido a partir de medidas de presión. También sirve para explicar el «Principio de Arquímedes» y la «Ley de Pascal», dos de los resultados más famosos y útiles de la mecánica de los fluidos.

El **Principio de Arquímedes**, **figura 7.3**, establece que un cuerpo sumergido total o parcialmente en un fluido experimenta un empuje o fuerza hacia arriba igual al peso del volumen de fluido desalojado. La **Ley de Pascal**, **figura 7.4,** por su parte, establece que toda presión aplicada a un fluido confinado se

Para convertir	a	Multiplique por
psi	Pa	6.8948×10^3
psi	in Hg	2.0359
psi	mm Hg	51.715
psi	µm Hg	51.715×10^3
psi	in H_2O	27.680
psi	cm H_2O	70.3072
psi	atm	0.068046
psi	bar	$6{,}8948 \times 10^{-2}$
psi	N/m^2	6.8948×10^3
psi	din/cm^2	6.8948×10^4
psi	kg/m^2	703.06
psi	lb/ft^2	144.0

Tabla 7.1 Factores de conversión de unidades de presión.

transmite sin reducción a todos los puntos del mismo y a las paredes del depósito que lo contiene. En otras palabras, si la presión en un punto se incrementa o disminuye en una cantidad ΔP, en todos los demás puntos la presión varía en la misma cantidad.

Otros resultados fundamentales de la mecánica de los fluidos, relacionados principalmente con fluidos en movimiento, son la Ecuación de Continuidad y el Teorema de Bernoulli, **figura 7.5**. La **Ecuación de Continuidad** establece que, en cualquier punto de un fluido en movimiento, la **rapidez de flujo**, es decir el producto de la velocidad por el área transversal (Av), es constante, es decir no cambia. El **Teorema de Bernoulli**, por su parte, establece que, en cualquier punto de un fluido en movimiento, la **presión total** (P_T), es decir la suma de las presiones **estática** (P_S) y **dinámica** (P_D) asociadas con el mismo, es también constante.

La **presión estática** es la presión que existe en un punto de un fluido en virtud de su posición, incluso aunque no haya movimiento, y la **presión dinámica** la debida a la energía cinética del mismo, es decir a la velocidad que lleva. La primera se ejerce perpendicularmente a la dirección del flujo y la segunda, llamada también **presión de impacto**, paralelamente a la misma.

Sensores de presión

Los **sensores de presión**, **figura 7.6**, como su nombre lo indica, miden **presión** o fuerza por unidad de área. Los sensores de presión detectan presión convirtiéndola inicialmente en movimiento mediante transductores primarios especialmente diseñados y construidos para producir una deflexión proporcional a la presión aplicada. A continuación, esta deflexión es convertida en una señal eléctrica equivalente utilizando galgas, LVDTs, potenciómetros y otros tipos de transductores de movimiento. En la **figura 7.7** se muestran algunos elementos mecánicos comúnmente utilizados en los sensores de presión para convertir presión en movimiento.

Figura 7.6 Presentaciones comunes de sensores de presión

Los tubos de Bourdon, por ejemplo, son tubos metálicos curvados, abiertos en un extremo y sellados en el otro, con una sección transversal ovalada. El fluido cuya presión se desea medir ingresa por el extremo abierto, anclado mecánicamente. Como resultado, aparece una fuerza en el extremo sellado que causa la de-

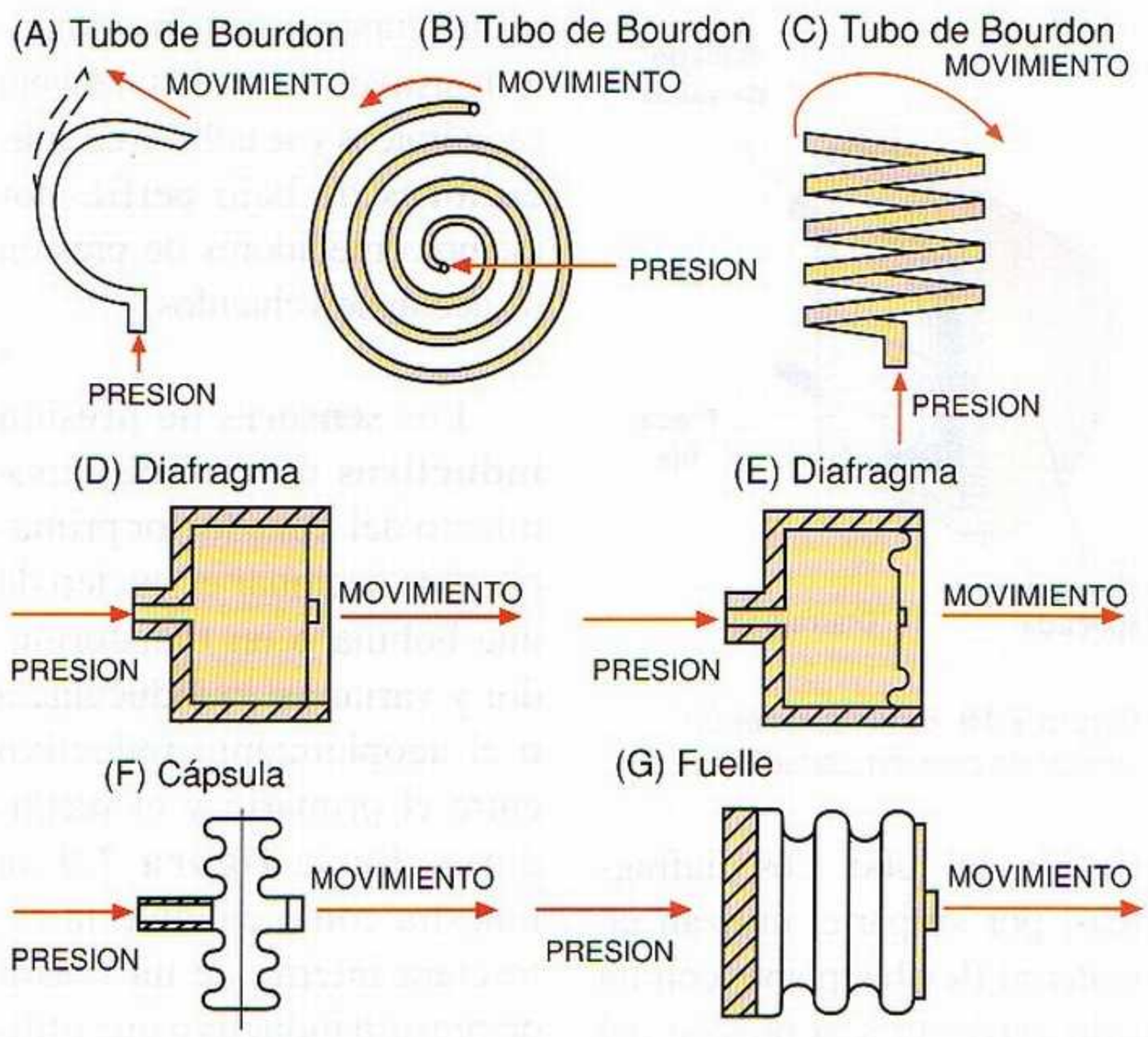


Figura 7.7 Configuraciones típicas de transductores primarios utilizados en sensores de presión.

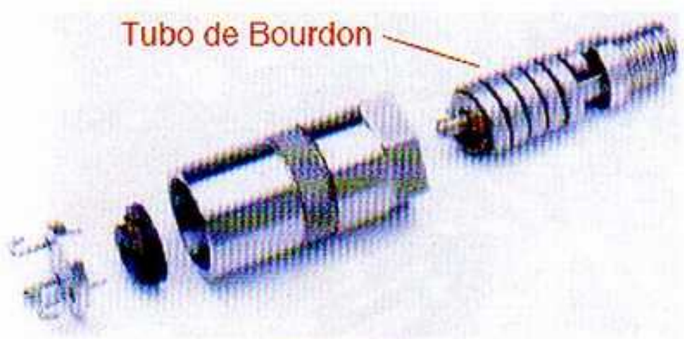


Figura 7.8. Estructura de un sensor de presión potenciométrico

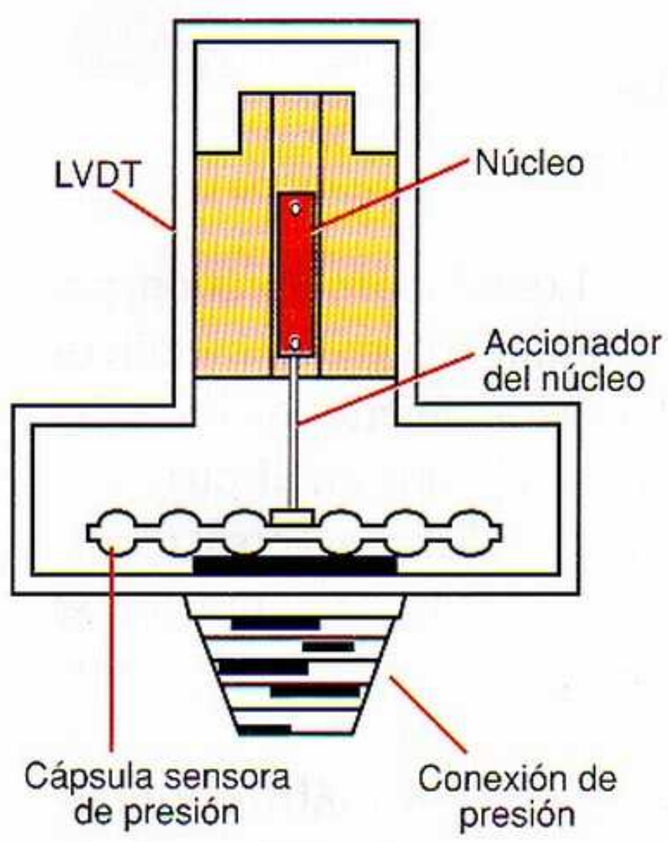


Figura 7.9. Estructura de un sensor de presión inductivo con LVDT

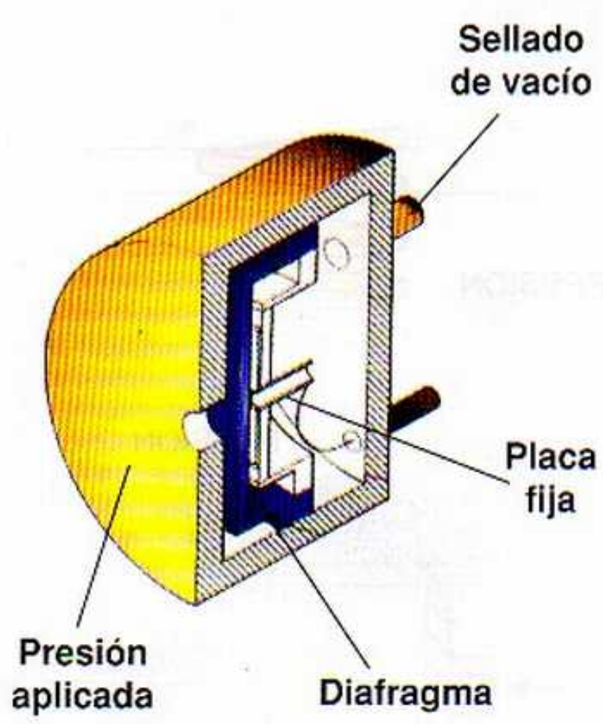


Figura 7.10. Estructura de un sensor de presión capacitivo

flexión del tubo. Los diafragmas, por su parte, utilizan un material flexible plano, con un lado expuesto a la presión del proceso y el otro a una presión de referencia. El diafragma se dobla hacia el lado de más baja presión. En ambos casos, el movimiento mecánico resultante puede ser transmitido al núcleo de un LVDT, o al cursor de un potenciómetro, para convertirlo en una señal eléctrica.

Los sensores de presión pueden ser de varios tipos dependiendo de la tecnología utilizada para convertir la información del transductor primario en una señal eléctrica. Desde este punto de vista, se habla de transductores potenciométricos, inductivos, capacitivos, piezoeléctricos, de galgas, piezorresistivos, micromecánicos, etc. Los sensores **de presión potenciométricos**, como el mostrado en la **figura 7.8**, por ejemplo, utilizan un tubo de Bourdon, una cápsula o un fuelle para impulsar un cursor sobre un elemento resistivo. Son relativamente económicos y se utilizan en aplicaciones de bajo perfil, por ejemplo medidores de presión de aceite de vehículos.

Los **sensores de presión inductivos** utilizan el movimiento del transductor primario para accionar el núcleo de una bobina o un transformador y variar así la inductancia o el acoplamiento inductivo entre el primario y el secundario. En la **figura 7.9** se muestra como ejemplo la estructura interna de un sensor de presión inductivo que utiliza un LVDT accionado por una cápsula.

Los **sensores de presión capacitivos,** como el mostrado en la **figura 7.10**, utilizan un transductor tipo diafragma como una de las placas de un condensador. Al aplicar una presión, el diafragma se deflecta y varía la capacitancia. Este cambio, que puede llegar a ser superior a 100 pF, se aprovecha para controlar la frecuencia de un oscilador o el acoplamiento de una señal AC a través de una red.

Los **sensores de presión piezoeléctricos**, como el mostrado en la **figura 7.11**, utilizan una lámina metalizada de cuarzo o material cerámico para convertir la fuerza transmitida por un diafragma en una señal eléctrica periódica, generalmente una onda seno o un tren de pulsos. Se emplean principalmente para medir presiones variables y se caracterizan por su excelente estabilidad térmica.

Los **sensores de presión de galga extensiométrica**, como el mostrado en la **figura 7.12**, utilizan un diafragma que se deflecta proporcionalmente a la presión aplicada y una galga o puente de galgas adheridas a él que varían su resistencia de acuerdo a la magnitud de la fuerza resultante. Tanto el diafragma como las galgas pueden ser de material metálico o semiconductor, siendo esta última la opción más utilizada en la actualidad.

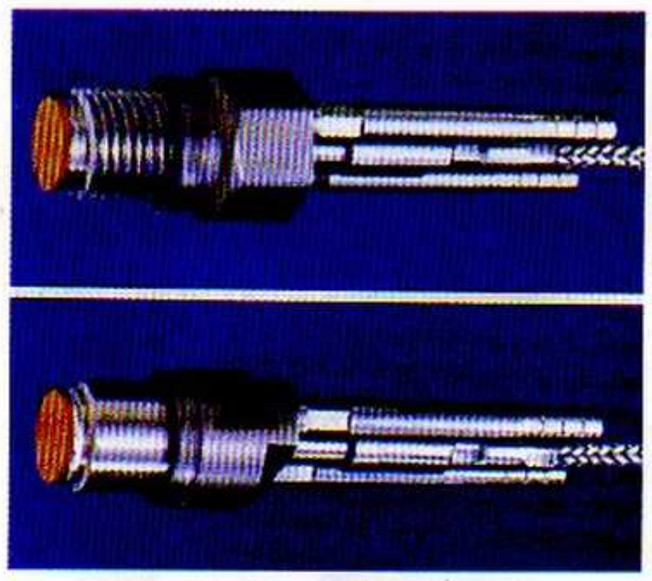


Figura 7.11 Sensores de presión piezoeléctricos

Las galgas obtenidas de esta forma, que son mucho más sensibles que las metálicas, se denominan **piezorresistores** y constituyen el núcleo de los **sensores de presión piezorresistivos** modernos. El efecto piezorresistivo es el principio de transducción de presión estándar adoptado por la industria semiconductora. Típicamente hay cuatro piezorresistores dentro del área del diafragma de un sensor piezorresistivo y los mismos están interconectados formando un puente de Wheatstone, con dos de ellos sometidos a tensión tangencial y los otros dos a tensión radial.

Los **sensores de presión micromecanizados**, como el mostrado en la **figura 7.13**, consisten básicamente de una delgada estructura tipo puente de galgas, aislada térmicamente y suspendida sobre una cavidad hecha en el silicio a través de la cual pasa el fluido. Se utilizan para mediciones de baja presión en aplicaciones donde puede tolerarse un pequeño flujo a través del elemento, por ejemplo sistemas HVAC o de calefacción, ventilación y aire acondicionado.

También se dispone de **interruptores de presión**, como los mostrados en la **figura 7.14**, los cuales permutan el estado de uno o más contactos NO o NC cuando la presión medida alcanza un nivel predeterminado o *set point*. Este cambio de estado puede ser utilizado, por ejemplo, para señalizar un circuito lógico, un microcontrolador, un PLC, etc., o energizar directamente un actuador, digamos una electroválvula, una bomba de vaciado, un compresor, etc.

Actualmente, la tendencia es hacia los sensores de presión **inteligentes**, los cuales, además de los bloques funcionales básicos ofrecen también otras características avanzadas, incluyendo la indicación digital directa del valor de la presión y la posibilidad de ser programados por el usuario a la medida de sus necesidades. El modelo mostrado en la **figura 7.15**, por ejemplo, de la serie PPT de **Honeywell**, está dotado de los dos puertos de presión usuales y un conector tipo DIN de seis pines, con una salida análoga nominal de 0 a 5V y una interfaz digital serial RS-232 de dos hilos, a través de la cual se puede configurar el rango del voltaje de salida, las unidades (psig, psid, psia) y otros parámetros..

La selección de un sensor de presión requiere principalmente el conocimiento del fluido con el fin de garantizar su compatibilidad con los materiales utilizados en el sensor, así como del tipo de medición (manométrica, diferencial, absoluta), el rango de presiones a medir, el tipo de salida eléctrica deseada, la exactitud re-

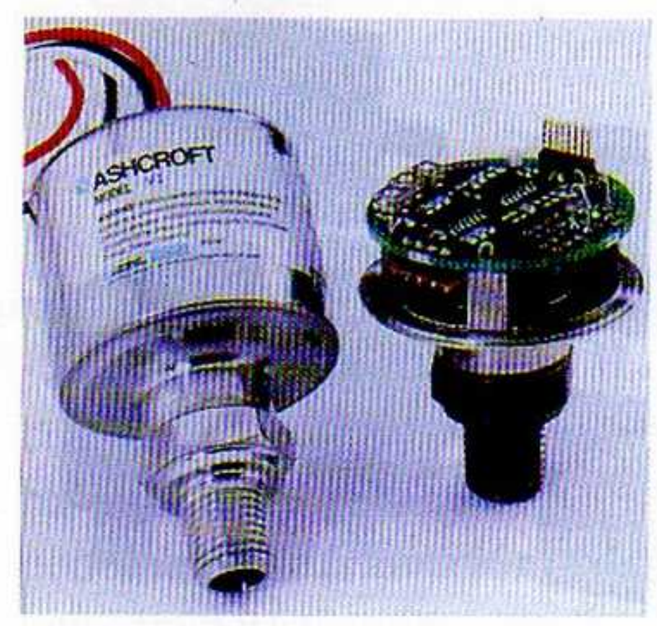


Figura 7.12 Sensor de presión piezoeléctrico de galgas extensiométricas con un rango de 0 a 5000 psi. Su fabricante es Dresser Industries (www.dresser.com/instruments)

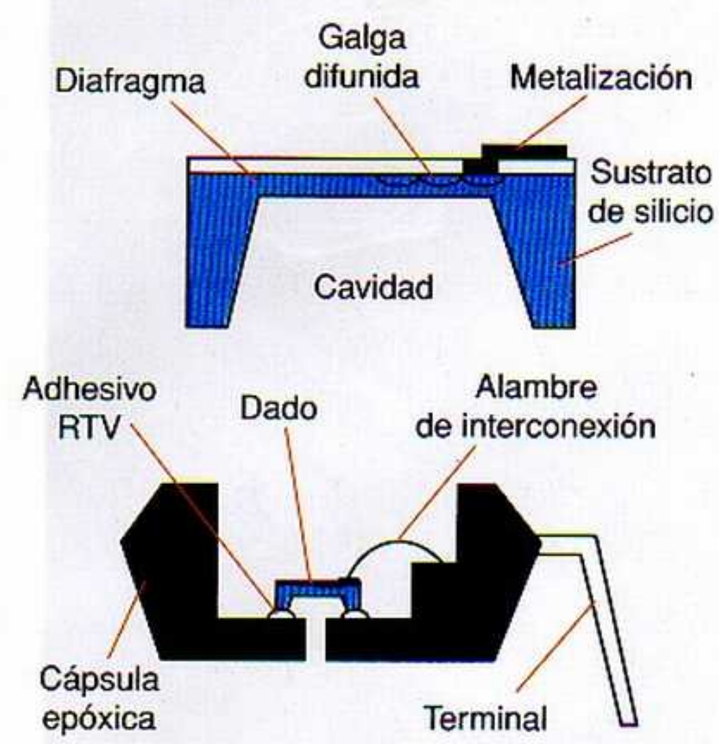


Figura 7.13. Estructura de un sensor de presión piezorresistivo micromecanizado. En la parte inferior se ilustra el acople del dado, el cual incluye la adhesión mecánica (RTV) a la cápsula epóxica y la interconexión eléctrica al mundo externo.

querida y el rango de temperatura de operación. Las especificaciones nominales de un sensor de presión PPT típico de 20 psi, por ejemplo, podrían ser las siguientes:

Rango (FS)	0 a 20 psi
Resolución	0.005 psi
Rango de salida análogo	0 a 5 V
Resolución análoga	1.22 mV
Exactitud	0.05 %FS
Rango de temperatura	-45ºC a 85ºC

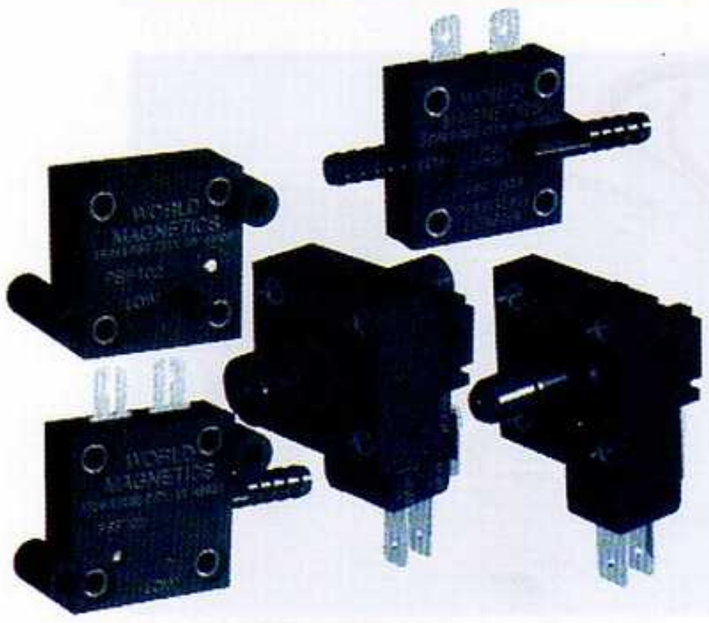


Figura 7.14 Interruptores de presión con set points desde 0.1" de H_2O hasta 60 psi. Su fabricante es World Magnetics (www.worldmagnetics.com)

Figura 7.15. Transductor de presión inteligente PPT (*Precision Pressure Transducer*) configurable entre ±1 psi y ±500 psi. Su fabricante es Honeywell, Inc. (www.ssec.honeywell.com)

Por tanto, en este caso, una presión de entrada, digamos, de 16.75 psi produciría 4.187V (=16.75x5/20) en la salida análoga. Otros datos que especifican los fabricantes son el voltaje de alimentación, el tiempo de respuesta (100 µs, típico), la deriva (*offset*), el tipo de empaque, la histéresis, la linealidad, la repetibilidad, la sensibilidad, las impedancias de entrada y de salida, etc. La histéresis, por ejemplo, expresada como un porcentaje de la escala total, digamos ±0.1%FS, se refiere a la habilidad del sensor para proporcionar la misma salida a una temperatura dada, antes y después de un ciclo de temperatura.

Sensores de flujo y caudal

Los sensores de flujo, **figura 7.16,** como su nombre lo indica, detectan y miden **flujo**, es decir transferencia de materiales de un sitio a otro a través de tuberías, mangueras, canales, bandas transportadoras, conductos abiertos o cerrados, etc. Estos materiales pueden ser materias primas, productos o desechos en forma de sólidos, líquidos, gases o sólidos que flotan en líquidos. El flujo de un material es siempre la respuesta a una fuerza aplicada, producida, por ejemplo, por un motor, una bomba hidráulica, un compresor de aire, una cabeza de presión estática, etc. Los sensores de flujo se denominan comúnmente **caudalímetros.**

Las mediciones exactas de flujo son importantes en los procesos industriales para garantizar que las materias primas se suministren a la velocidad apropiada y en las proporciones correctas, y prevenir la ocurrencia de presiones o temperaturas peligrosas, así como desbordamientos y otros efectos nocivos. También permiten determinar la cantidad de producto que ha pasado del proveedor al cliente, facilitando su inventario, valoración y contabilización. En todos estos casos, importa primariamente conocer el **caudal** o rata de flujo del material, es decir qué tan rápida o lentamente se está moviendo o desplazando. Combinando las mediciones de caudal con mediciones de volumen o masa se puede determinar la cantidad de material que está siendo transportada.

Desde este último punto de vista, se habla de flujo **volumétrico** y flujo **másico**, referidos, respectivamente, al volumen o masa de material que pasa por un punto determinado durante un período determinado. Por ejemplo, si un líquido fluye a una velocidad (v) de 4 m/s a través de una tubería de 0.3 m2 de área transversal (A), entonces la rata de flujo volumétrico (Q) del mismo es simplemente $Q = v \times A = 4 \times 0.3 = 1.2\ m^3/s$. Por tanto, existen caudalímetros de flujo **másico** y caudalímetros de flujo **volumétrico**. Estos últimos son los más comunes.

***Figura 7.16**. Los sensores de flujo o caudalímetros trabajan con base a una gran variedad de principios físicos. En la fotografía se muestran algunos ejemplos representativos de tecnologías modernas*

El flujo de un líquido a través de una tubería depende esencialmente de cuatro factores: su velocidad de flujo (v), su densidad (∂), su viscosidad (μ) y el diámetro de la tubería (∅). La viscosidad, en particular, se refiere a la mayor o menor facilidad que tiene el fluido para correr. Su unidad de medida es el Poise (P). La densidad, por su parte, representa su peso por unidad de volumen. Tanto la viscosidad como la densidad son afectadas por los cambios de temperatura, disminuyendo a medida que aumenta está última, y viceversa. Estos parámetros se relacionan entre sí mediante el llamado **número de Reynolds** (R) así:

$$R = \frac{v \cdot \varnothing \cdot \partial}{\mu}$$

siendo v la velocidad (m/s), ∅ el diámetro (m), ∂ la densidad (kg/m^3) y μ la viscosidad (P). Dependiendo del valor de R, se habla de flujo **laminar** o flujo **turbulento**, **figura 7.17**. El flujo **laminar** en particular, corresponde a valores de R inferiores a 7 000 y se presenta a bajas velocidades o con líquidos muy viscosos. Se caracteriza porque el movimiento del fluido se realiza en capas paralelas cuya velocidad disminuye progresivamente a medida que se alejan del centro, siendo máxima en este último punto y mínima, prácticamente cero, en las paredes.

El flujo **turbulento** corresponde a valores de R por encima de 8 000 y se presenta en altas velocidades o con líquidos poco viscosos. Se caracteriza porque el movimiento del fluido se realiza en forma de remolinos o torbellinos que viajan en todas las direcciones y producen una rata de flujo constante. Los flujos con valores de R entre 7 000 y 8 000 se denominan **de transición** y tienen características intermedias. Por lo general, un caudalímetro diseñado para medir flujo laminar no produce lecturas correctas en presencia de flujo turbulento, y viceversa. Por esta razón, al seleccionar un caudalímetro, es importante conocer el valor de R para el fluido particular considerado.

La mayoría de los caudalímetros se basan en métodos de medida indirectos, siendo los más comunes la presión di-

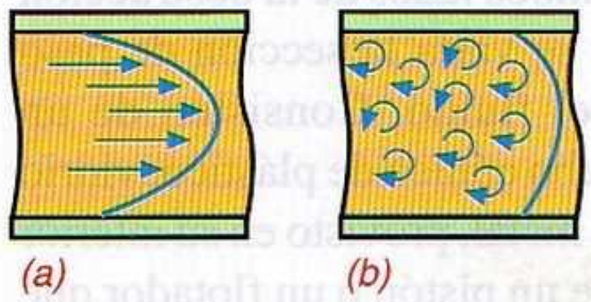


***Figura 7.17**. Perfiles típicos de movimiento de fluidos*
***(a)** Flujo laminar.*
***(b)** Flujo turbulento.*

ferencial, el desplazamiento positivo, la velocidad y el flujo másico. Los **caudalímetros de obstrucción** o **presión diferencial, figura 7.18**, por ejemplo, se utilizan para medir el flujo de fluidos a través de tuberías. En los mismos se interpone una placa con un orificio de tamaño y forma específica cuya función es reducir el área a través de la cual circula el líquido para cambiar su velocidad y crear así una diferencia de presiones (ΔP) a ambos lados. Esta última puede ser medida con un sensor de presión diferencial y utilizada para calcular la velocidad a la cual sale el fluido del orificio. Multiplicando esta velocidad por el área del orificio y un factor de corrección llamado **coeficiente de descarga** (Cd), del orden de 0.6 a 0.97, se obtiene el caudal volumétrico (Q).

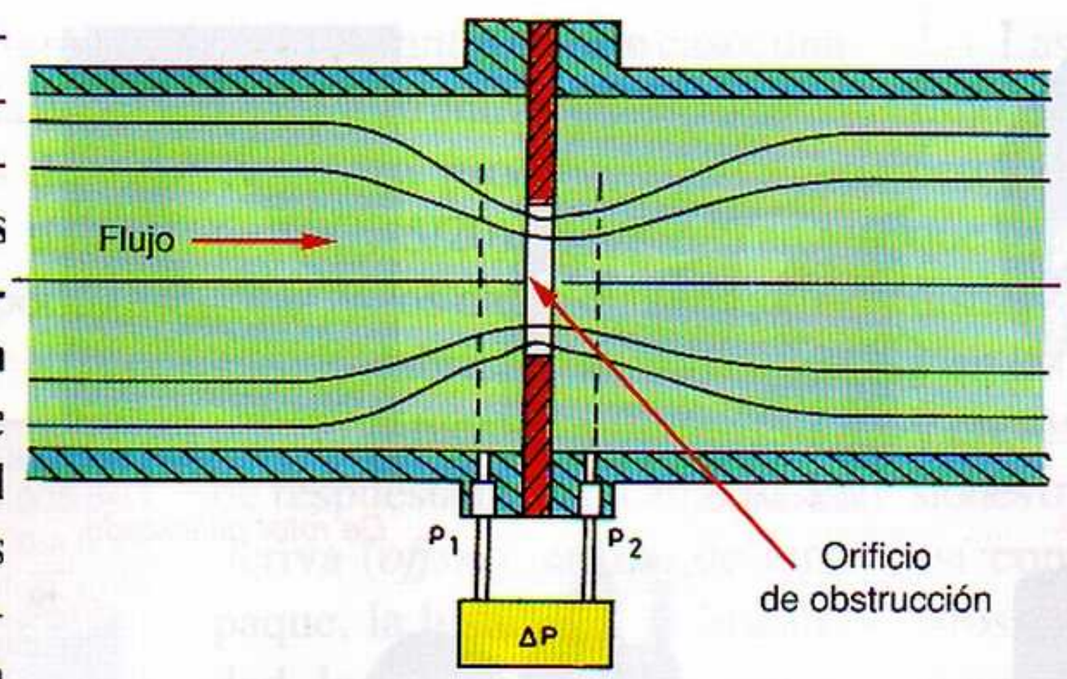


Figura 7.18. Principio de funcionamiento de un caudalímetro de obstrucción o presión diferencial.

Una variante son los **rotámetros** o **caudalímetros de área variable, figura 7.19**, en los cuales, como su nombre lo indica, se mantiene constante la diferencia de presiones a ambos lados de la obstrucción y se varía la sección de paso del fluido. Consisten de un tubo cónico de plástico, vidrio o metal, provisto en su interior de un pistón o un flotador que es arrastrado por el fluido. Este último ingresa por la parte inferior y sale por la superior. Si no hay flujo, el flotador permanece en reposo en la parte del tubo que tiene su mismo diámetro. Al aumentar el caudal, el flotador se desplaza hacia arriba hasta alcanzar una altura proporcional al caudal. Su posición puede ser leída sobre una escala graduada en el tubo o detectada mediante un captador magnético u óptico.

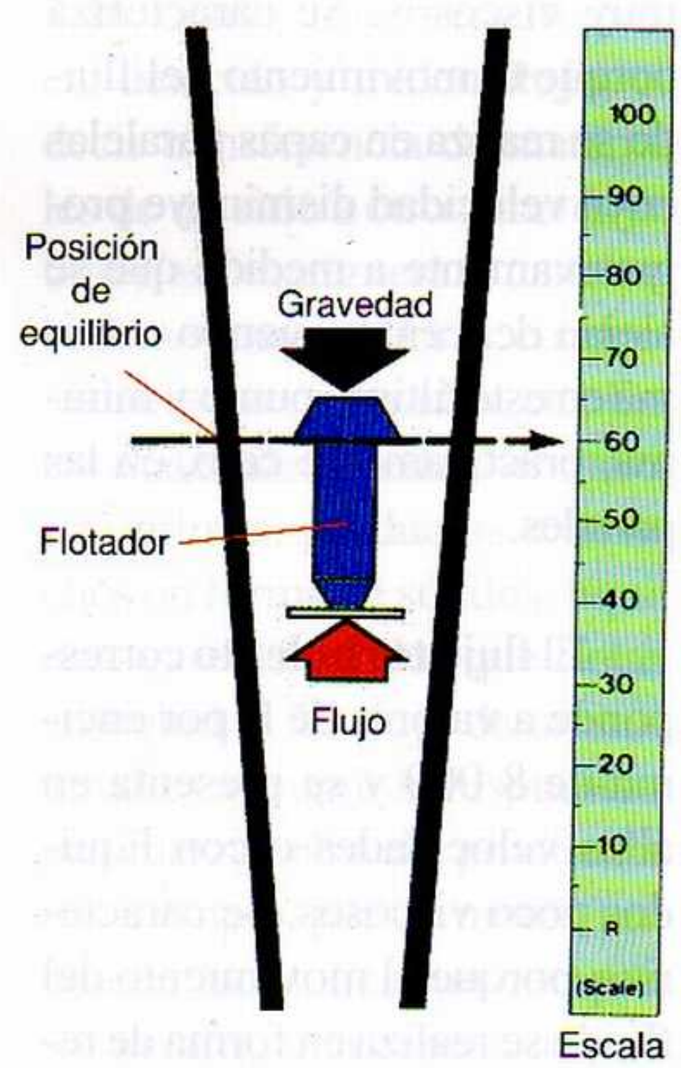


Figura 7.19. Rotámetro o caudalímetro de área variable. Principio de funcionamiento.

Los **caudalímetros de desplazamiento positivo** operan separando el fluido en segmentos de volumen conocido. La versión más común es el **caudalímetro de aspas rotatorias, figura 7.20a**, compuesto de una cámara cilíndrica con dos puertos, uno de entrada y otro de salida, y un rotor acanalado donde se alojan unas aspas resortadas. A medida que el fluido llena la cámara, el rotor es obligado a girar a una cierta velocidad, provocando que las aspas entren y salgan del mismo, y así se mantengan en contacto constante con las paredes del cilindro. El fluido contenido en cada sección es descargado cuando la misma alcanza el puerto de salida. El caudal se obtiene multiplicando las r.p.m. de giro del rotor por el volumen descargado en cada vuelta.

Otra forma común de caudalímetro de desplazamiento positivo es el **medidor de lóbulos, figura 7.20b**, constituido por dos piñones de forma elíptica, cuidadosamente mecanizados, que son impulsados por el movimiento del fluido y giran desfasados 90º entre sí. Puesto que los piñones están en contacto permanente entre sí y con las paredes de la cámara, forman un sello, lo cual les permite transportar en cada vuelta un volumen de líquido conocido.

Multiplicando este volumen por el número de r.p.m. se obtiene el caudal volumétrico. La información de las r.p.m. puede ser suministrada, por ejemplo, por un sensor de proximidad inductivo asociado a un contador.

Los **caudalímetros de turbina, figura 7.21**, están constituidos por una rueda alabeada que gira con una velocidad proporcional a la velocidad de flujo del fluido. Multiplicando esta última velocidad por el área de la sección de paso se obtiene el caudal volumétrico. La velocidad de giro de las paletas se detecta mediante un captador magnético, formado por un imán permanente colocado dentro de una bobina. Cada vez que uno de los álabes o cuchillas de la turbina pasa a través del campo magnético del imán, distorsiona las líneas de flujo del mismo e induce un pulso de voltaje en la bobina. La frecuencia de estos pulsos es proporcional a la velocidad de rotación de la turbina y, por tanto, al caudal volumétrico.

Los **medidores de flujo másico** proporcionan el peso real del fluido que pasa durante un período dado de tiempo. Puesto que esta lectura es directa y no utiliza datos inferidos de otras variables, la misma es exacta y no depende de la naturaleza sólida o líquida del fluido ni de su viscosidad, temperatura, presión y otros factores. Las mediciones de flujo másico se aplican principalmente a materiales sólidos presentados en forma de polvo, pastillas, granos y otros tipos de partículas pequeñas. En la **figura 7.22** se muestra como ejemplo un método para determinar el flujo másico de un polvo conducido a través de una banda transportadora.

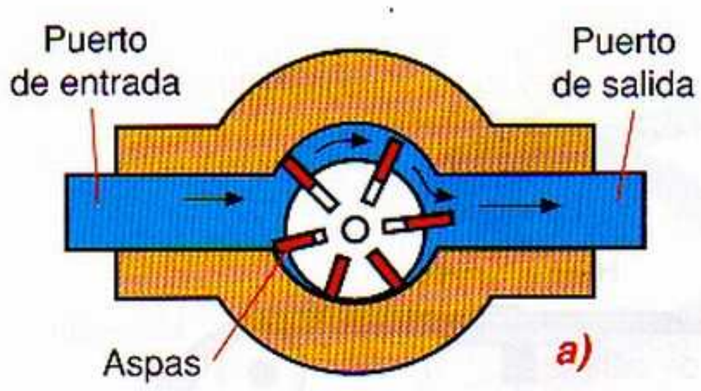


Figura 7.20 Caudalímetros de desplazamiento positivo (a) Caudalímetro de aspas o paletas rotatorias. Funcionamiento (b) Caudalímetro de lóbulos impulsores. Aspecto físico.

En este sistema, el polvo es liberado por la tolva y transferido a través de la banda transportadora a otro sitio, digamos: una tina de mezcla, un tanque de almacenamiento, la bodega de un barco, etc. La celda de carga determina el peso (W) del material contenido en una longitud fija (L) de la correa. El flujo másico (M) está dado por

$$M = \frac{W \cdot V}{L}$$

Siendo v la velocidad de la banda transportadora. Por ejemplo, si esta última se mueve a 0.25 m/s, la longitud de la plataforma de pesado es de 3 metros y el peso medido por la celda es de 150 kg, entonces el flujo másico es de (150 x 0.25)/3 = 12.5 kg/s. La cantidad de material transferida por la banda puede controlarse variando la velocidad de esta última o regulando la salida del mismo de la tolva.

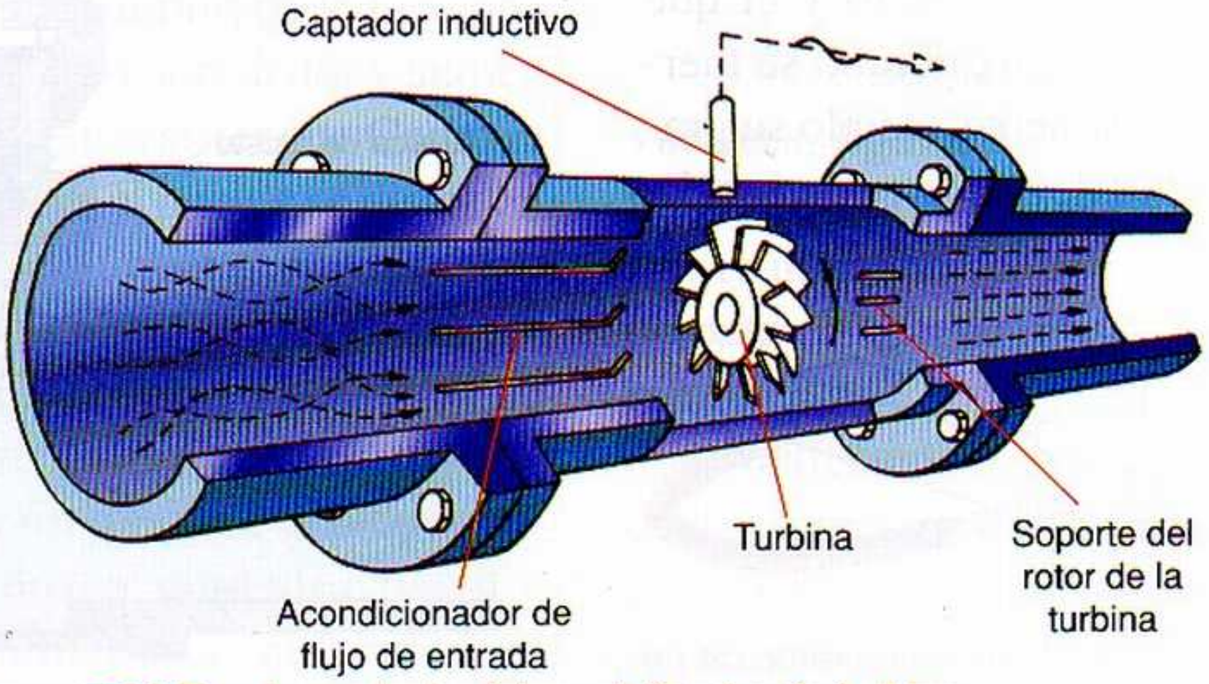


Figura 7.21 Funcionamiento del caudalímetro de turbina.

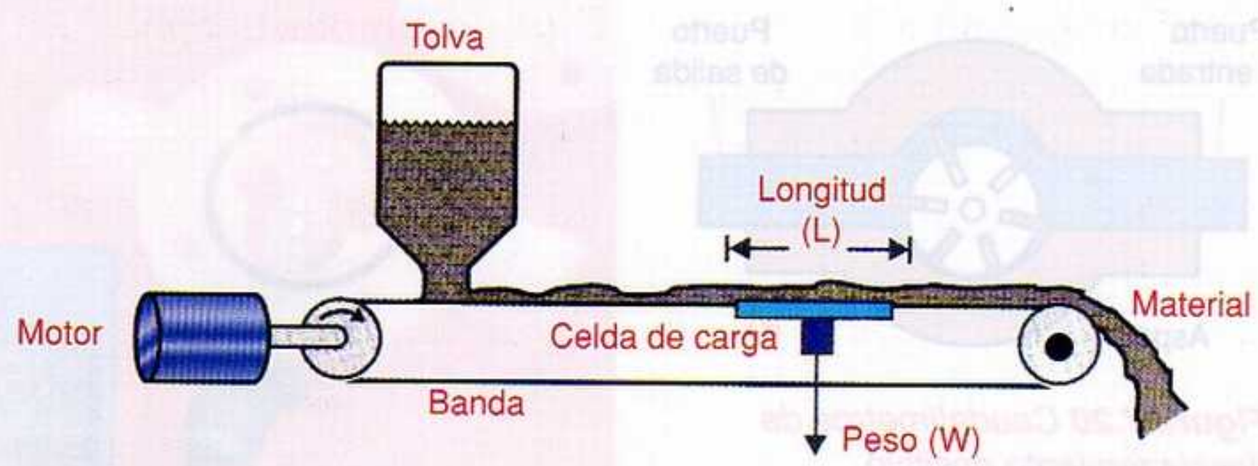


Figura 7.22. Sistema de banda transportadora y celda de carga usado para medir el flujo másico de materiales sólidos

Naturalmente, también se dispone de caudalímetros electrónicos. Los más comunes son: los medidores de Coriolis, los detectores de flujo rotóricos, los detectores de flujo electromagnéticos, los caudalímetros térmicos, los caudalímetros de vórtice y los caudalímetros ultrasónicos.

El **medidor de Coriolis, figura 7.23**, por ejemplo, consiste de un tubo metálico en forma de U localizado en las inmediaciones de unas bobinas y a través del cual circula el fluido. Al aplicar una corriente pulsatoria a las bobinas, el campo magnético producido hace que el tubo vibre, en forma parecida a un diapasón. Como resultado de la interacción entre este movimiento y el que lleva el fluido, el tubo se tuerce lateralmente, siendo su grado de deflexión proporcional a la masa de líquido que pasa a través de él. La cantidad de torsión es registrada por sensores magnéticos montados en ambos extremos del tubo. Con este método se puede medir flujo másico de todo tipo de fluidos.

Los **detectores rotóricos, figura 7.24**, se insertan dentro de las tuberías utilizando un accesorio en forma de T y recurren a un sencillo sistema de rotor de rueda paletizada (*paddlewheel*), impulsado por el fluido, que gira a una velocidad proporcional a la rata de flujo. El rotor consta de cuatro cuchillas, cada una de las cuales incluye un imán permanente que excita un dispositivo de efecto Hall y produce en cada paso un pulso de voltaje. Contando el número de pulsos producidos durante un determinado período de tiempo se obtiene una indicación del caudal volumétrico. Este tipo de sensores, que sustituyen a los caudalímetros de turbina en muchas aplicaciones, pueden ser utilizados con una amplia variedad de líquidos, incluyendo ácidos, solventes y fluidos corrosivos.

Los **caudalímetros electromagnéticos, figura 7.25**, están basados en la Ley de Faraday, la cual establece que si un conductor se mueve a través de un campo magnético, entonces se induce en el mismo un voltaje proporcional a su longitud, su velocidad de desplazamiento y la intensidad del campo. En este caso, el fluido en movimiento actúa como conductor, mientras que el campo lo establecen dos bobinas montadas en las paredes exteriores de la tubería y

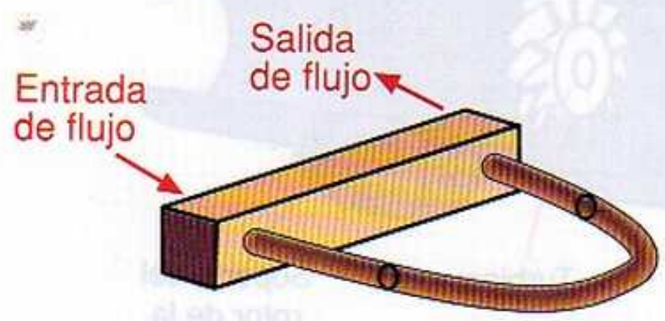


Figura 7.23. Funcionamiento de un medidor de Coriolis.

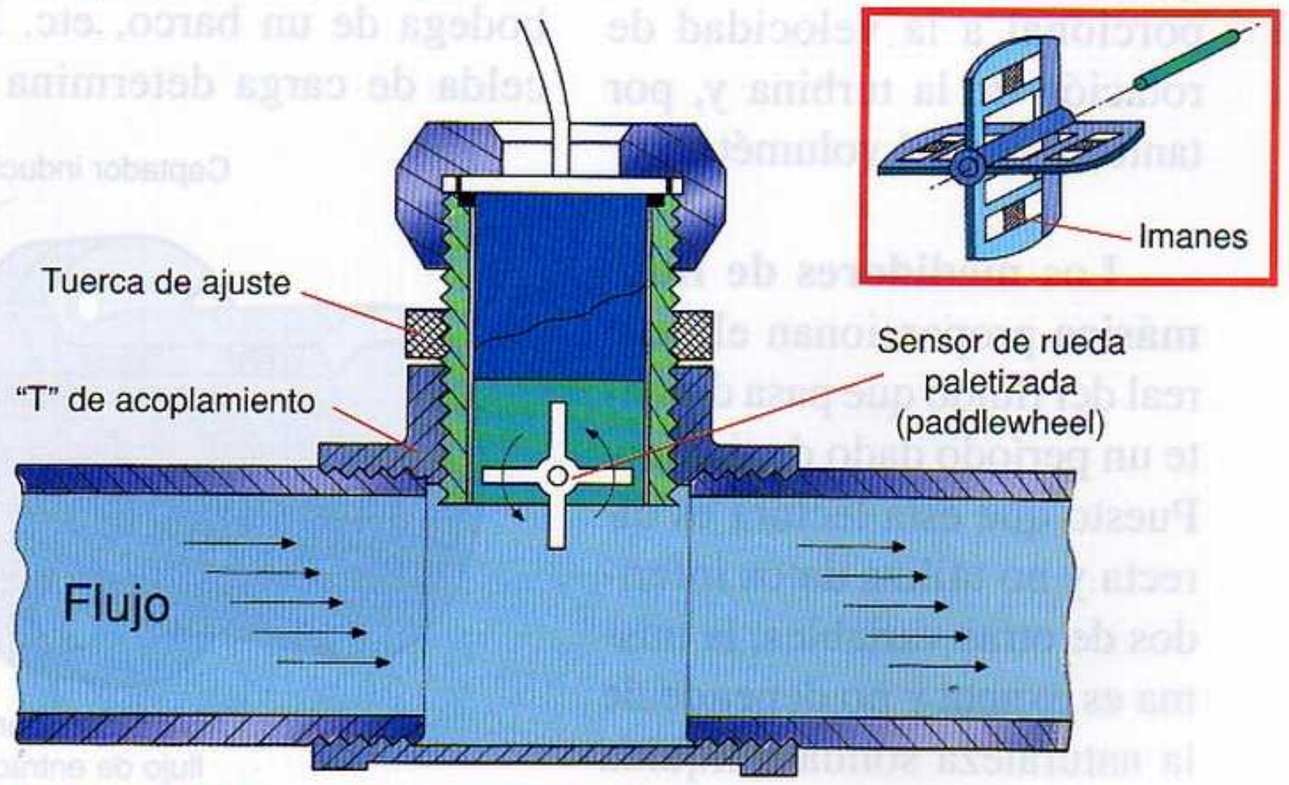
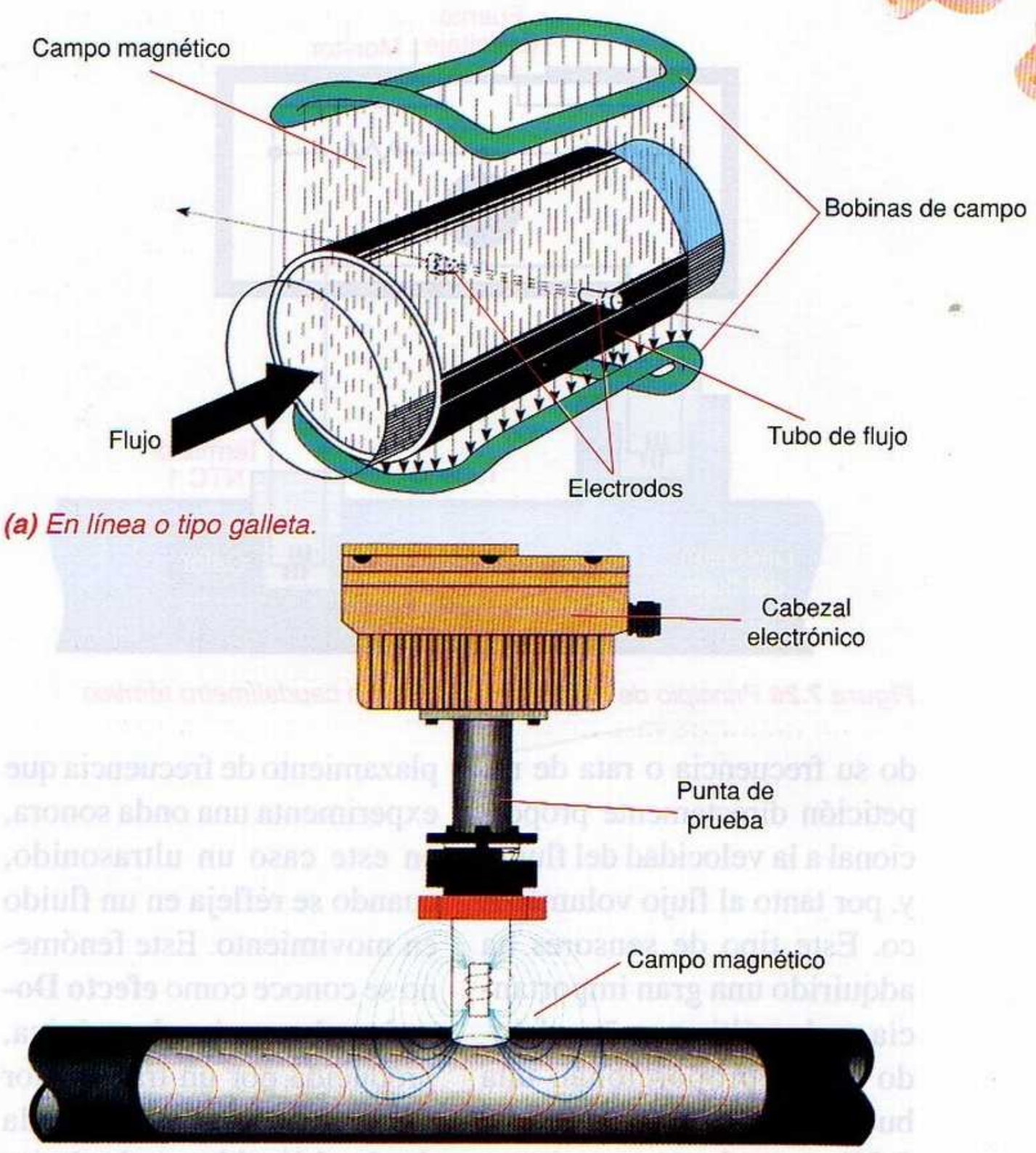


Figura 7.24. Caudalímetro de rueda de paletas

excitadas por un voltaje DC pulsante. El voltaje inducido, que es proporcional al caudal volumétrico, se capta a través de dos electrodos localizados en las paredes internas del tubo. Este tipo de sensores se utilizan generalmente con fluidos difíciles y corrosivos, así como con emulsiones, ácidos, aguas residuales, detergentes, comidas líquidas, etc.

Los caudalímetros electromagnéticos se denominan también **magmetros** y, dependiendo del método de montaje, pueden ser básicamente de dos tipos: de inserción y estilo galleta. En estos últimos, **figura 7.25(a)**, utilizados para aplicaciones de alta precisión, el campo magnético se produce a través de toda la sección transversal del tubo de flujo, mientras que en los primeros, **figura 7.25(b)** se radia hacia fuera de la punta de prueba. De cualquier modo, para aplicar la Ley de Faraday a un fluido en movimiento, es absolutamente necesario que este último sea conductor. Por esta razón, los caudalímetro magnéticos trabajan mejor con soluciones acuosas que con hidrocarburos.



(a) En línea o tipo galleta.

(b) De inserción.

Figura 7.25 Principio de funcionamiento de caudalímetros electromagnéticos

Los **caudalímetros térmicos, figura 7.26**, utilizan dos termistores sumergidos dentro del fluido e integrados a un puente de Weathstone. El primer termistor (NTC1) está en contacto con el fluido, mientras que el segundo (NTC2) está blindado, actuando como compensador de temperatura. A medida que pasa, el fluido retira calor del termistor 1, disminuyendo la temperatura a su alrededor y aumentando su resistencia. Como resultado, el puente se desbalancea y aumenta el voltaje de salida. Este último es proporcional a la rata de flujo y puede ser detectado directamente con un medidor análogo calibrado en unidades de flujo volumétrico o utilizado para excitar un medidor electrónico. La resistencia del termistor 2 no se ve afectada por el flujo, pero sí por la temperatura del fluido.

Los **caudalímetros de vórtices, figura 7.27**, utilizan un objeto sin forma aerodinámica sumergido dentro del fluido para crear aguas abajo unos remolinos o torbellinos llamados **vórtices de Karman**, los cuales siguen un patrón predecible. Tales vórtices pueden ser detectados mediante un sensor de presión o ultrasónico, sien-

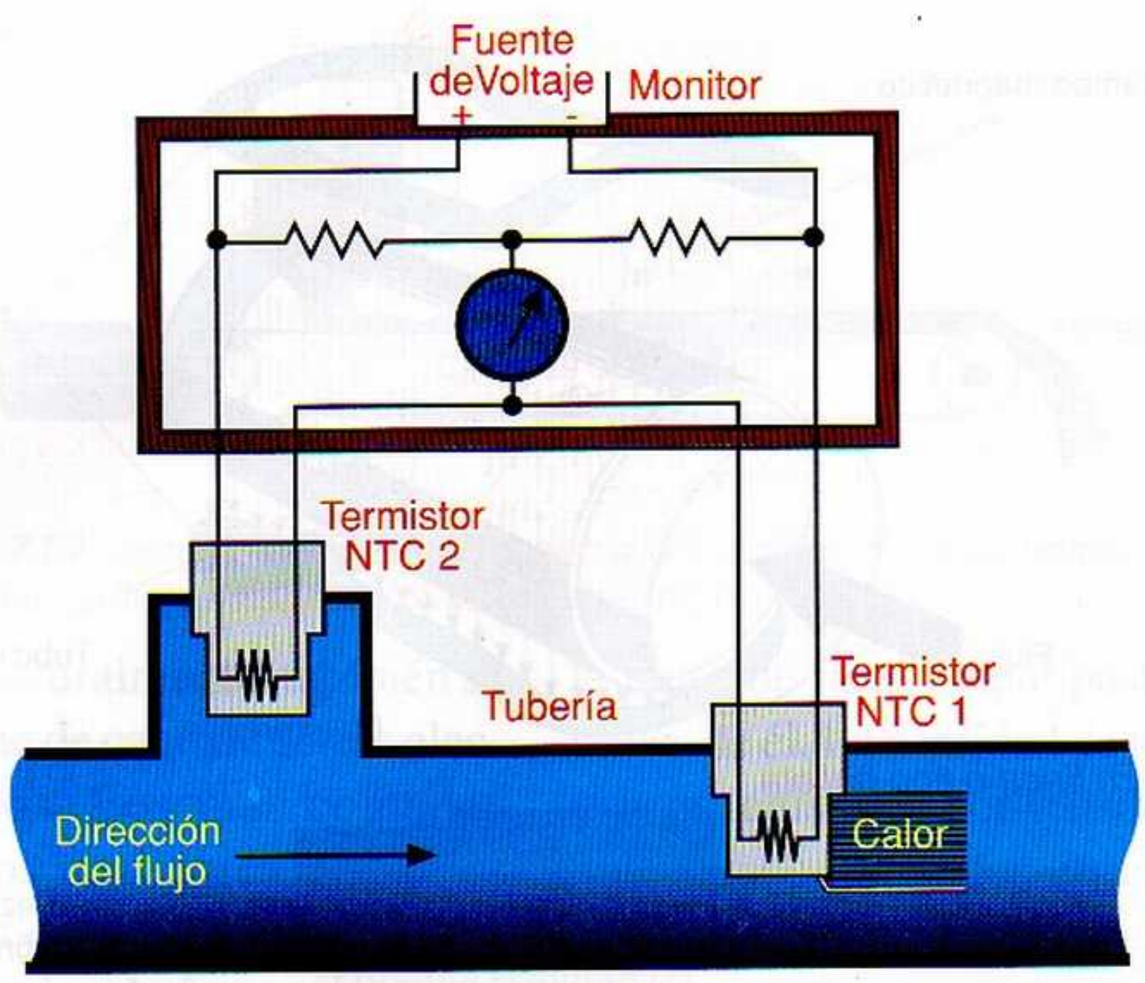


Figura 7.26 Principio de funcionamiento de un caudalímetro térmico

do su frecuencia o rata de repetición directamente proporcional a la velocidad del fluido y, por tanto al flujo volumétrico. Este tipo de sensores ha adquirido una gran importancia en los últimos años debido a que proporcionan una buena exactitud, del orden del 0.5%, son robustos, no tienen partes móviles y están libres de mantenimiento. No obstante, para impedir atascamientos, deben utilizarse solamente con líquidos limpios, no abrasivos ni corrosivos.

Finalmente, los **caudalímetros ultrasónicos**, **figura 7.28**, están basados en el desplazamiento de frecuencia que experimenta una onda sonora, en este caso un ultrasonido, cuando se refleja en un fluido en movimiento. Este fenómeno se conoce como **efecto Doppler**. La onda ultrasónica, producida por un transductor piezoelectrico, es reflejada desde el líquido por burbujas de aire o partículas sólidas en suspensión y captada por otro transductor piezoeléctrico, el cual la convierte en una señal eléctrica equivalente. La diferencia de frecuencia entre la señal transmitida y la señal recibida es proporcional a la velocidad del fluido y, por tanto, a su caudal volumétrico. Este tipo de sensores se instalan fuera de las tuberías y por tanto son adecuados para todo tipo de fluidos.

Los caudalímetros ultrasónicos basados en el efecto Doppler requieren que exista por lo menos un nivel de 25 ppm (partes por millón) de burbujas o partículas sólidas en suspensión que actúen como reflectores y las mismas tengan un diámetro de 30 micras o superior. Para fluidos limpios, sin partículas reflectoras, existen también sensores ultrasónicos de flujo basados en la medición de los **tiempos de tránsito** de la onda, es decir los que demora la radiación en alcanzar el receptor cuando se propaga tanto en la dirección del flujo (a favor) como en la dirección opuesta (en contra). La diferencia entre estos tiempos es proporcional a la velocidad del fluido y a su caudal.

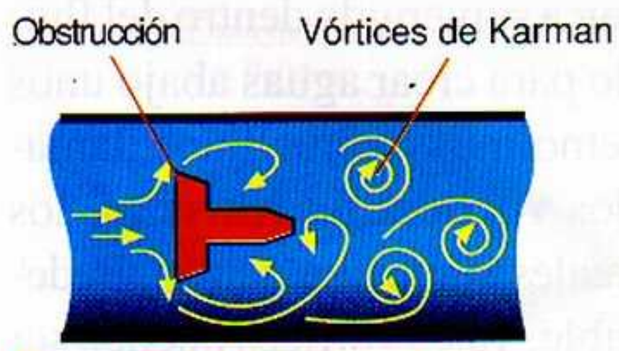


Figura 7.27 Principio de funcionamiento de un caudalímetro de vórtices

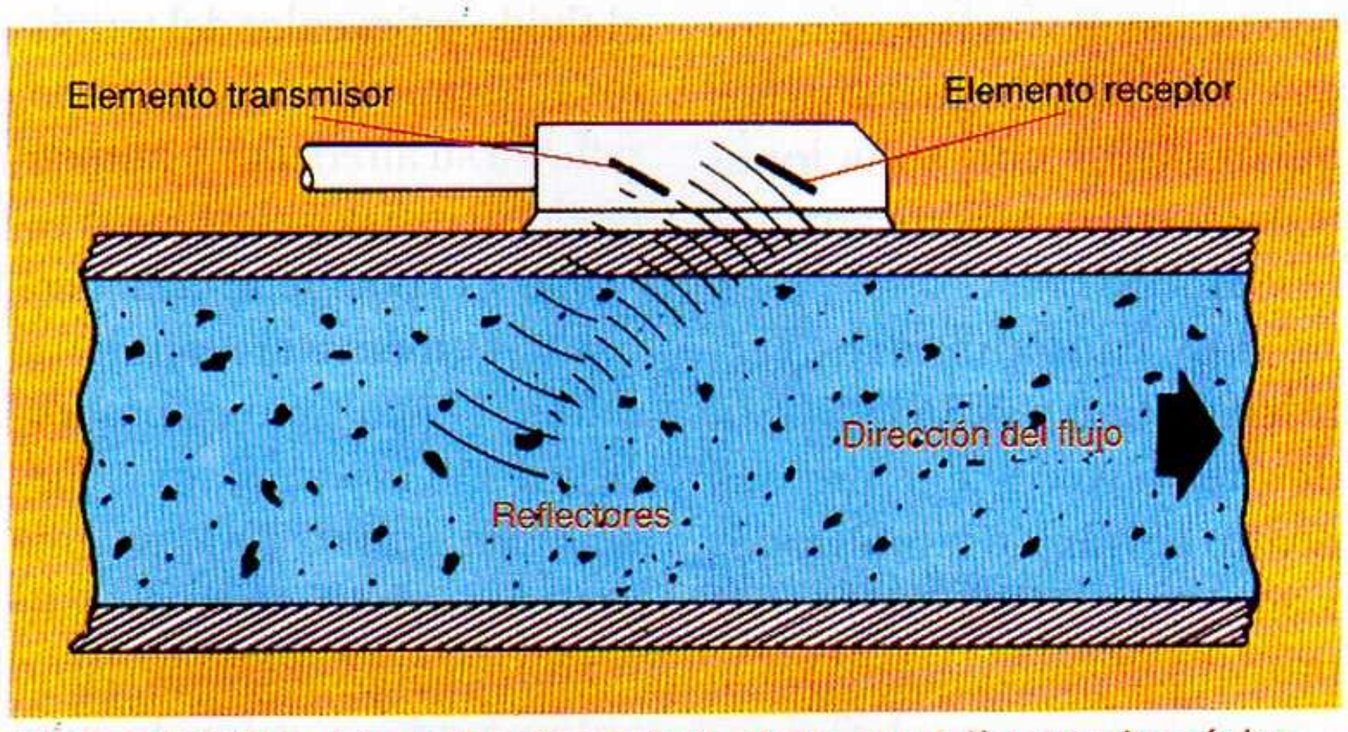


Figura 7.28 Principio de funcionamiento de un caudalímetro ultrasónico de efecto Doppler

*Figura 7.29 Los transductores de nivel se ofrecen en una gran variedad de presentaciones y trabajan con base en principios físicos relativamente sencillos. En la figura se muestran modelos representativos de sensores tipo flag (**a**), de flotador (**b, i**), ultrasónicos (**c, e**), capacitivos (**d, j**), vibratorios (**h**),ópticos (**f**) y de montaje lateral (**g**)*

Transductores de nivel

Los **transductores de nivel**, **figura 7.29**, como su nombre lo indica, detectan o miden **nivel**, es decir la altura a la cual un material llena un tanque, una tolva, un silo, un bolsillo, una bodega u otro tipo de contenedor. El material puede ser un líquido o un producto sólido en forma de polvo, granos, hojuelas, etc.

Las mediciones de nivel son parte integral de muchos procesos industriales. Las mismas permiten conocer las reservas disponibles de un material y prevenir su agotamiento o desbordamiento, así como garantizar que los ingredientes de alimentos, químicos y otros productos similares, fabricados con base en fórmulas, se mezclen en las cantidades exactas requeridas.

El nivel se mide localizando la frontera o **interfase** entre dos medios, digamos un líquido o un polvo en contacto con el aire en un tanque abierto, o una capa de aceite flotando sobre agua, **figura 7.30**. Esta medición puede hacerse por métodos **directos**, por ejemplo utilizando un flotador; o por métodos **indirectos**, digamos midiendo la presión en el fondo de un tanque. Los métodos directos son generalmente **invasivos**, es decir, implican un contacto directo del sensor con el material a medir, mientras que los métodos indirectos son típicamente **no invasivos**. Estos últimos son los preferidos cuando se trabaja con materiales corrosivos, peligrosos o sometidos a altas temperaturas o altas presiones.

Las mediciones de nivel pueden ser también **puntuales** o **continuas**, dependiendo, respectivamente, de si la detección de la interfase se realiza en puntos específicos o a través de todas las posiciones posibles dentro de un rango dado. La detección puntual es la requerida, por ejemplo, para marcar los límites inferior y superior de llenado de un tanque y alertar así cuando el mismo necesita ser rellenado o se ha desbordado.

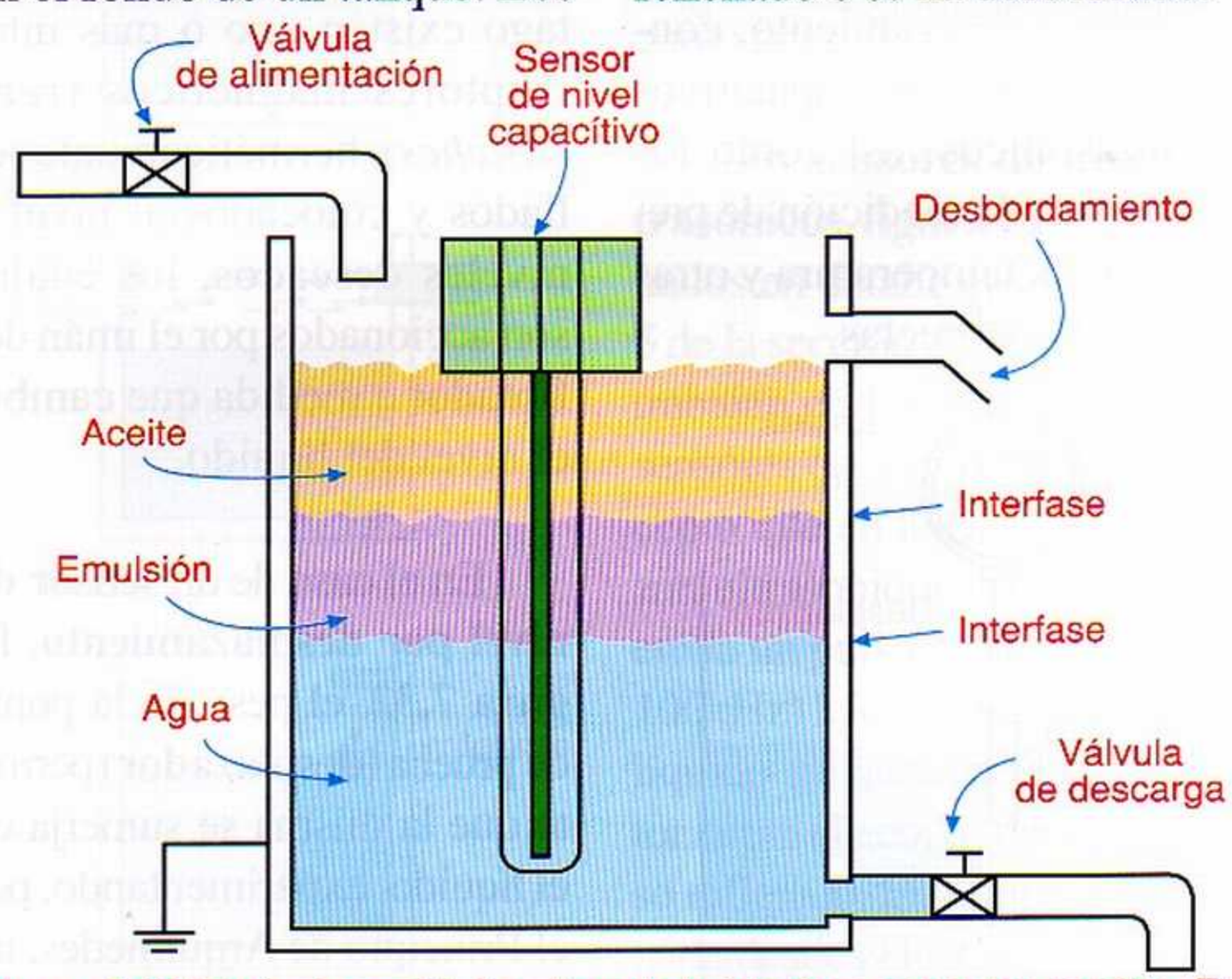


Figura 7.30 El nivel se mide localizando la interfase entre dos medios. En este caso se utiliza un sensor de nivel capacitivo para medir la altura de las columnas de agua y aceite. La emulsión que se forma entre ambos medios actúa como capa fronteriza.

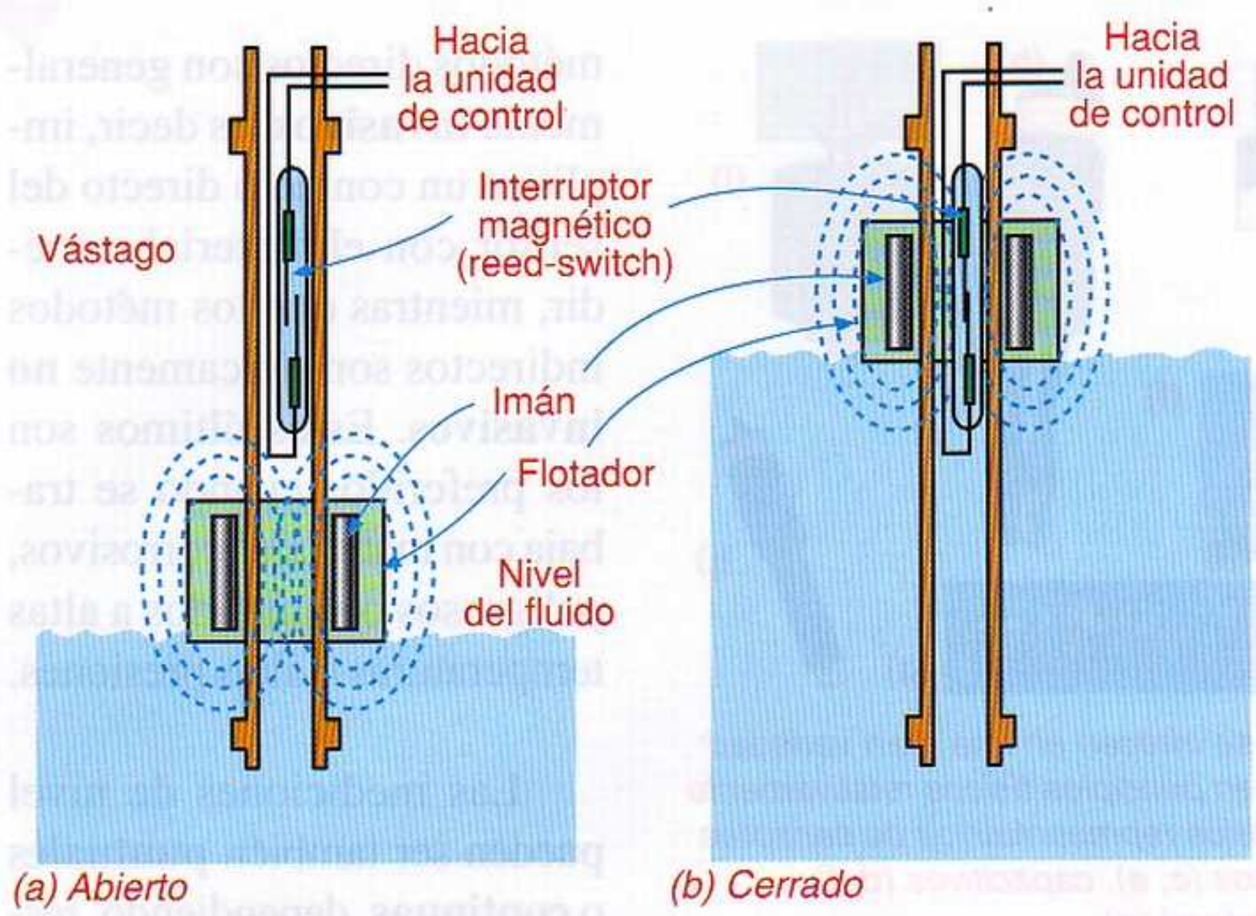


Figura 7.31. Interruptor de nivel magnético tipo flotador

Actualmente se dispone de una gran variedad de tecnologías de transductores que miden y detectan nivel puntual o continuo de manera directa o indirecta y permiten la implementación de sistemas de control automático. Los más comunes son los basados en flotadores y efectos vibratorios, de desplazamiento, conductivos, ópticos, capacitivos y ultrasónicos; así como los basados en la medición de presión, peso, temperatura y otras variables indirectas.

Figura 7.32 Principio de operación de un sensor de nivel por desplazamiento

En la **figura 7.31** se ilustra como funciona un transductor de nivel basado en un **flotador**. Este último está equipado con un imán toroidal y se mueve directamente con la superficie del líquido siguiendo un vástago o tubo guía que lo atraviesa por el centro. En el interior del vástago existen uno o más interruptores magnéticos (*reed switches*), herméticamente sellados y colocados al nivel o niveles deseados, los cuales son accionados por el imán del flotador a medida que cambia el nivel del líquido.

En el caso de un **sensor de nivel por desplazamiento**, **figura 7.32**, el peso de la punta de prueba (**desplazador**) permite que la misma se sumerja en el líquido, experimentando, por el Principio de Arquímedes, un empuje hacia arriba igual al volumen de fluido desplazado. Este empuje causa que el desplazador se mueva proporcionalmente al nivel del líquido. Dicho movimiento, que es muy pequeño, puede ser captado, por ejemplo, por un LVDT, y convertido en una señal eléctrica equivalente. Este tipo de sensores se utilizan en tanques abiertos y son especialmente apropiados para medir la interfase de líquidos inmiscibles (que no se pueden mezclar).

Otro tipo de transductor, basado en el principio de Arquímedes, es el **sensor de nivel tipo flag, figura 7.33**. En el mismo, un flotador, equipado con un imán permanente, descansa en la superficie del líquido contenido dentro de una cubierta de flotación, subiendo y bajando a medida que lo hace el líquido en el tanque. La posición del flotador, y por tanto el nivel del líquido, es indicada por una persiana de banderines magnéticos (*flags*), normalmente rojos por un lado y blancos por el otro, los cuales giran, cambiando de color, cuando interactúan con el imán. La indicación visual proporcionada por los *flags* puede ser cuantificada, por ejemplo, mediante una escala calibrada.

Los métodos fotoeléctricos, examinados en el **capítulo 4**, pueden ser también aplicados a la detección de nivel puntual si las propiedades del material bloquean confiablemente la transmisión de luz. En la **figura 7.34** se ilustran varias alternativas. En todos los casos, la luz del trans-

misor alcanza el receptor, directamente como en (a) y (c), o por reflexión como en (b) cuando el nivel del líquido está por debajo del sensor, y no lo hace cuando está por encima.

Los **sensores de nivel conductivos, figura 7.35**, se utilizan para medir líquidos conductores. Constan de dos o más electrodos alimentados por una señal AC de bajo voltaje y sumergidos en el líquido. Este último, por ser conductor, completa un circuito eléctrico, permitiendo la circulación de corriente. Cuando el nivel cae por debajo del electrodo más corto, el circuito se abre y cesa el flujo de corriente. Este cambio de estado del circuito puede ser utilizado para que un controlador ordene el rellenado del tanque o active una alarma.

Los **sensores de nivel capacitivos, figura 7.36**, se utilizan para mediciones de nivel continuo en materiales no conductores o con una baja constante dieléctrica. Constan básicamente de un electrodo aislado, el cual, al ser sumergido, forma con las paredes metálicas del tanque un condensador. El material actúa como dieléctrico. En el caso de tanques no metálicos se utiliza un segundo electrodo como placa de referencia. A medida que varía el nivel del material, cambia también la capacitancia del sistema. Este cambio es convertido, por un circuito de radiofrecuencia (RF), en una señal análoga proporcional al nivel o en señal "todo o nada" que acciona, por ejemplo, un relé.

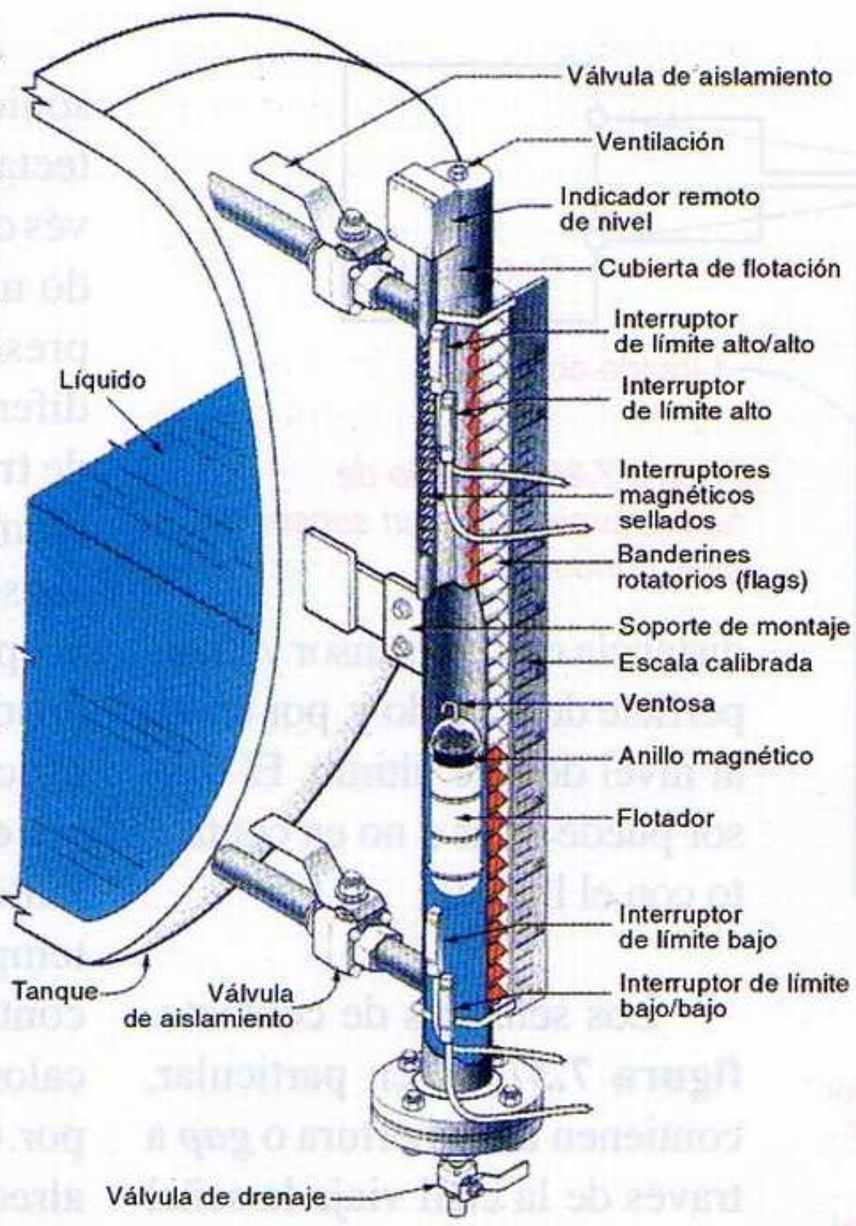
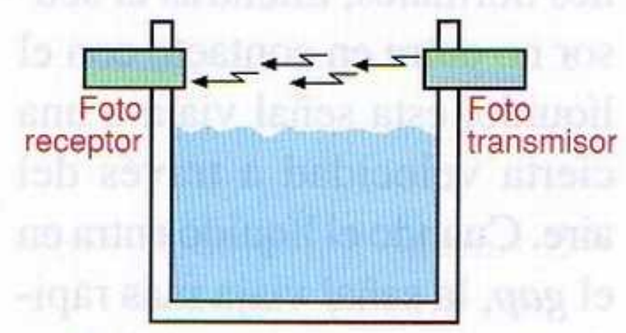
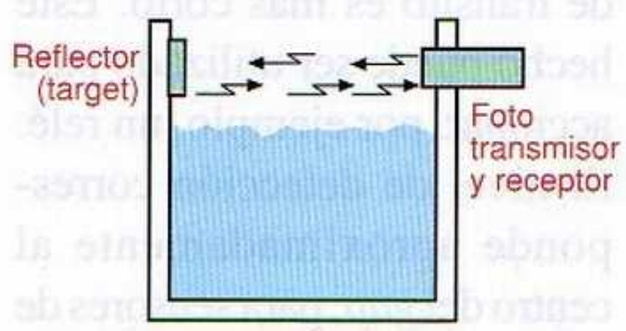


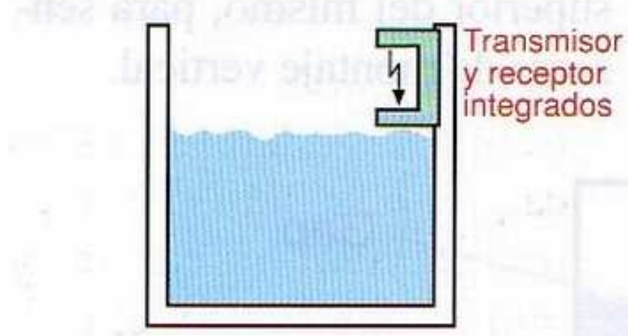
Figura 7.33 Instalación y partes de un sensor de nivel tipo flag



(a) Transmisivo.



(b) Retroreflectivo o reflex.



(c) Integrado (fotomicrosensor).

Figura 7.34 Detectores fotoeléctricos de nivel puntual

En el caso de un material conductor se aplica la misma lógica, excepto que el material actúa como la placa de referencia del condensador. También es posible medir nivel por métodos capacitivos **no intrusivos** o de no contacto. En este caso, el electrodo sensor es una placa plana paralela a la superficie del material. Si este último es conductivo, entonces actúa como la placa de referencia del condensador, mientras que si no lo es actúa como dieléctrico, con el tanque como placa de referencia.

Los **sensores de nivel ultrasónicos, figura 7.37**, examinados en detalle en el **capítulo 5** de la sección de **Actividades**, trabajan en forma similar a los sensores ópticos reflexivos, excepto que en lugar de luz utilizan ultrasonidos. El transmisor envía un pulso ultrasónico (20-100kHz) hacia la superficie del líquido mientras que el receptor capta el eco, es decir, el pulso reflejado. El tiempo transcurrido desde el instante en que se produce el pulso ultrasónico hasta el instante en que se recibe el eco, es proporcional a la

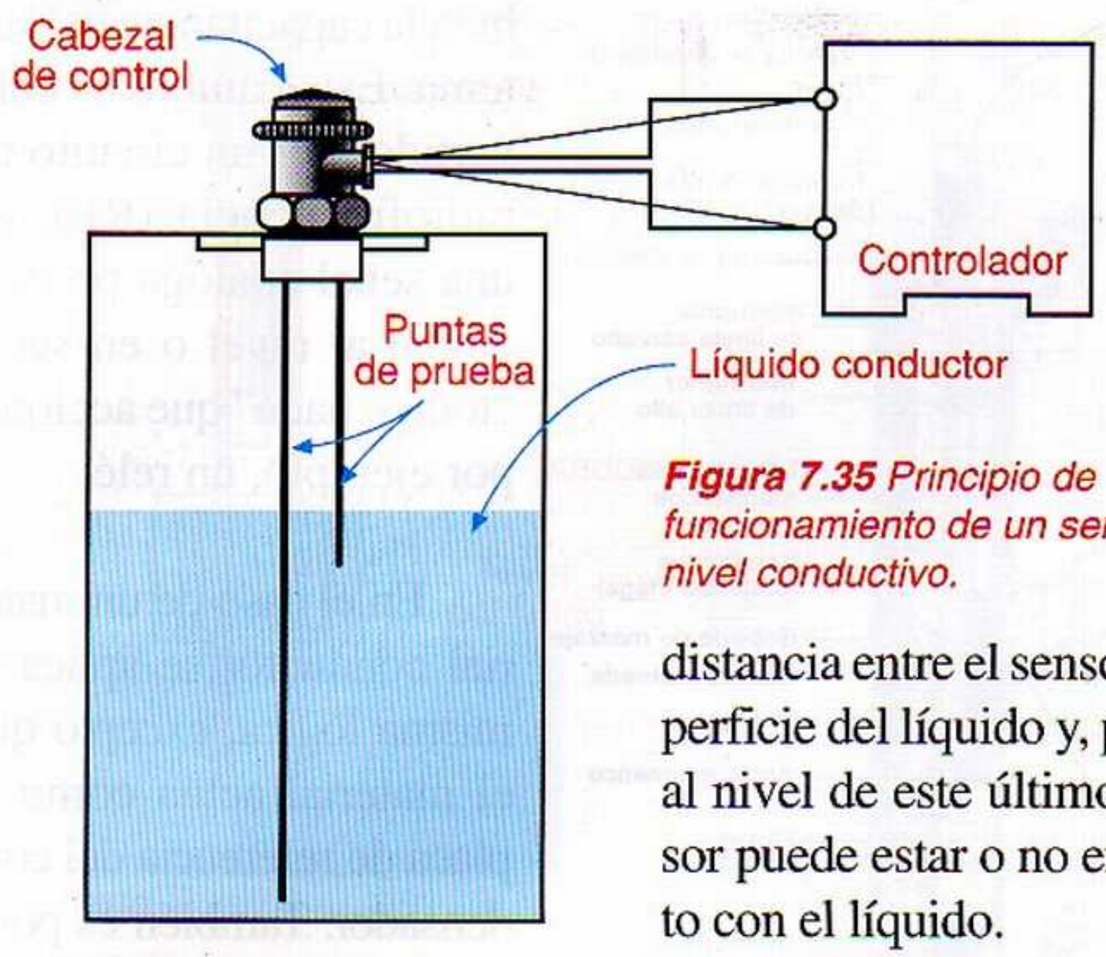


Figura 7.35 *Principio de funcionamiento de un sensor de nivel conductivo.*

distancia entre el sensor y la superficie del líquido y, por tanto, al nivel de este último. El sensor puede estar o no en contacto con el líquido.

Los sensores de contacto, **figura 7.37(b),** en particular, contienen una abertura o ***gap*** a través de la cual viaja la señal ultrasónica desde el transmisor hasta el receptor. En condiciones normales, mientras el sensor no entre en contacto con el líquido, esta señal viaja a una cierta velocidad a través del aire. Cuando el líquido entra en el *gap*, la señal viaja más rápidamente y, por tanto, el tiempo de tránsito es más corto. Este hecho puede ser utilizado para accionar, por ejemplo, un relé. El nivel de detección corresponde aproximadamente al centro del *gap*, para sensores de montaje horizontal y a la parte superior del mismo, para sensores de montaje vertical.

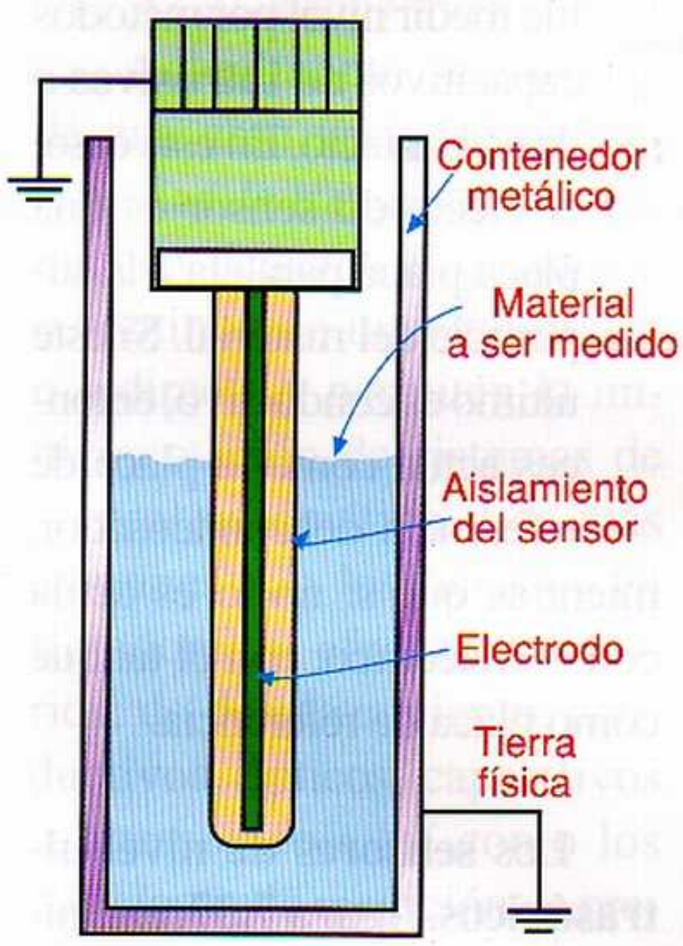
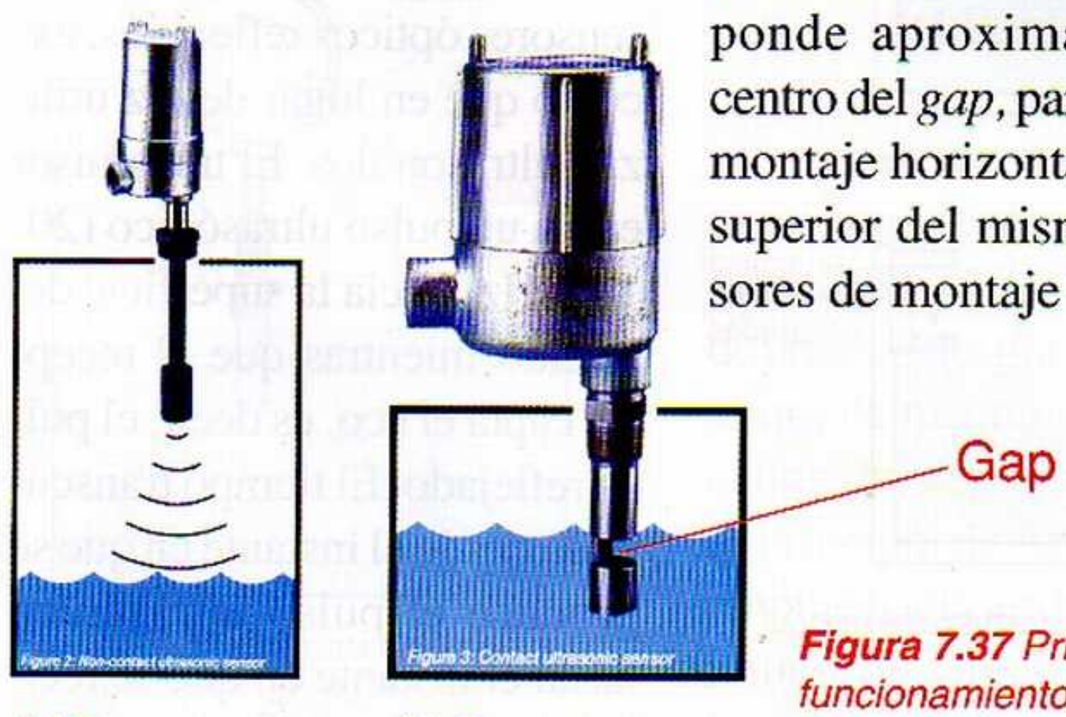


Figura 7.36 *Principio de funcionamiento de un sensor de nivel capacitivo*



(a) De no contacto *(b) De contacto*

Figura 7.37 *Principio de funcionamiento de sensores de nivel ultrasónicos*

Además del uso de ultrasonidos, el nivel puede ser detectado indirectamente a través de otras técnicas, incluyendo mediciones de calor, peso, presión hidrostática, presión diferencial, etc. En el método de **transferencia térmica,** por ejemplo, se autocalienta un sensor de temperatura resistivo por medios eléctricos. En condiciones normales, el calor evacuado desde el sensor hacia el aire es muy bajo y, por tanto, el mismo detecta una temperatura alta. Al entrar en contacto con el líquido, este calor se evacúa rápidamente y, por tanto, la temperatura a su alrededor disminuye.

Las mediciones por **presión** parten del hecho que la presión en el fondo de una columna de líquido es proporcional a la altura de la columna ($P=Po+\rho gh$). Por tanto, se puede conocer el nivel de un líquido en un tanque midiendo la diferencia de presiones (ΔP) entre el fondo (P) y la parte superior (Po) del mismo ($h=\Delta P/\rho g$).

Finalmente, las mediciones de nivel por peso requieren que el tanque esté completamente soportado por celdas de carga y que el peso esté distribuido uniformemente a través del mismo. Este tipo de mediciones son adecuadas para estimar la cantidad de material que hay en un tanque o contenedor, independientemente si se trata de un líquido o un sólido. Ω

Capítulo 8

Sensores de temperatura

La temperatura es una variable crítica utilizada para controlar la calidad de los productos en muchos procesos industriales. En este capítulo examinaremos las características generales de algunos tipos de sensores electrónicos empleados comúnmente en los ambientes industriales para medir y controlar temperatura de forma precisa, incluyendo termostatos, termorresistencias, termocuplas, pirómetros de radiación y sensores de silicio.

Generalidades

Muchos procesos industriales, **figura 8.1**, requieren el control preciso de la temperatura para producir resultados de calidad o prevenir sobrecalentamientos, rupturas, explosiones y otros tipos de problemas. Las temperaturas elevadas, por ejemplo, son necesarias para ablandar metales y fundir plásticos antes de ser moldeados en formas específicas. Asimismo, las bajas temperaturas son necesarias para conservar los productos perecederos en una industria procesadora de alimentos. De otro lado, una condición de sobretemperatura en un sistema cerrado, digamos una caldera, puede provocar una excesiva presión. También se requieren condiciones de temperatura precisas para combinar los ingredientes de productos químicos.

Actualmente se dispone de una gran variedad de dispositivos e instrumentos para la medición precisa de la temperatura, los cuales proporcionan una indicación visual o una señal de realimen-

Figura 8.1 Termómetro de no contacto, basado en un sensor infrarrojo, utilizado para medir la temperatura en el interior de un horno de fundición

Figura 8.2 Sensores electrónicos comunes, para la medición de temperatura en ambientes industriales

tación mecánica o eléctrica que puede ser utilizada en un sistema de lazo cerrado para permitir el control automático de procesos térmicos. En este capítulo nos referiremos exclusivamente a los principales tipos de sensores **electrónicos**, **figura 8.2**, que pueden ser clasificados, dependiendo de su principio de funcionamiento, así:

- Sensores **bimetálicos**. Popularmente conocidos como **termostatos**, son básicamente interruptores que producen una salida del tipo "todo o nada" y conmutan de un estado al otro cuando se alcanza un determinado valor de temperatura.

- Sensores **termorresistivos**. También denominados **termorresistencias**, son dispositivos cuya resistencia cambia a medida que lo hace la temperatura. Los más conocidos son los **detectores de temperatura resistivos** o **RTD** (*resistance temperature detectors*), basados en materiales metálicos como el platino y el níquel, y los **termistores**, basados en óxidos metálicos semiconductores.

- Sensores **termoeléctricos**. Popularmente conocidos como **termocuplas** o **termopares**, son dispositivos que producen un voltaje proporcional a la diferencia de temperatura entre el punto de unión de dos alambres metálicos disímiles (unión caliente) y cualquiera de los extremos libres (unión fría). Este fenómeno se denomina **efecto Seebeck**.

- Sensores **monolíticos** o de **silicio**. Son dispositivos basados en las propiedades térmicas de las uniones semiconductoras (PN), particularmente la dependencia de la tensión base-emisor (V_{BE}) de los transistores bipolares con la temperatura cuando la corriente de colector es constante. Generalmente incluyen sus propios circuitos de procesamiento de señales, así como varias funciones de interface especiales con el mundo externo.

- Sensores **piroeléctricos**. También denominados **termómetros de radiación**, son dispositivos que miden indirectamente la temperatura a partir de la medición de la radiación térmica infrarroja que emiten los cuerpos calientes.

Los termostatos, termorresistencias y sensores de silicio son dispositivos generalmente **invasivos**, es decir deben estar en contacto físico con la substancia u objeto cuya temperatura se desea medir. Los pirómetros de radiación, por su parte, son dispositivos invariablemente **no invasivos**, es decir realizan la medición a distancia. Estos últimos se utilizan principalmente para la medición de temperaturas muy altas o en situaciones donde los sensores anteriores no pueden ser empleados, por ejemplo, cuando el objeto o medio caliente se está moviendo, es muy pequeño, tiene una forma irregular, es inaccesible o puede ser contaminado por el contacto con el sensor.

Termostatos

Los **termostatos** son sensores del tipo "todo o nada" que conmutan automáticamente de un estado al otro cuando la temperatura a su alrededor alcanza un valor determinado. Constan generalmente de un **bimetal**, es decir una pieza formada por dos metales con distinto coeficiente de dilatación térmica, la cual se deforma según un arco circular uniforme cuando se produce un cambio de temperatura, **figura 8.3**. El radio de este arco (r) varia en forma inversamente proporcional a la diferencia de temperatura (T2-T1). Dicho movimiento puede ser utilizado para accionar uno o más contactos eléctricos (modo ON-OFF) o convertido, a través de un sensor de posición o desplazamiento, en una señal eléctrica equivalente.

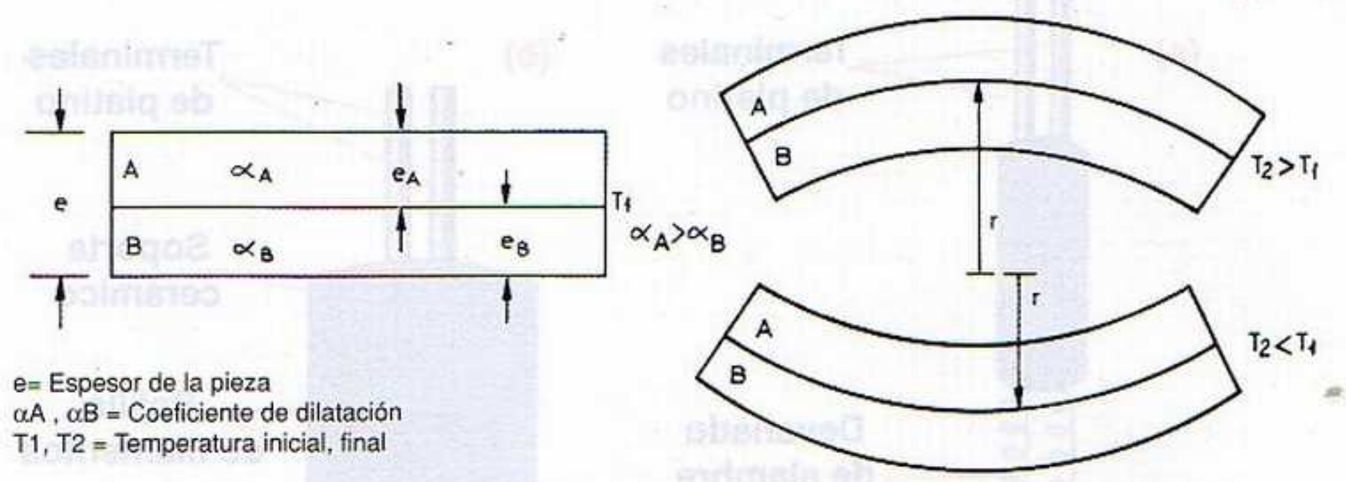


Figura 8.3 Principio de funcionamiento de un termostato bimetálico

Típicamente, la pieza bimetálica tiene un espesor de 10 µm a 3 mm. Como metal A se emplean latones y otras aleaciones. El metal B es generalmente una aleación de acero al níquel conocida como **invar**. Este tipo de sensores se fabrican para detectar temperaturas desde -75°C hasta +540°C y son también muy utilizados como dispositivos de protección en circuitos eléctricos. En este último caso, el bimetal es autocalentado por la propia corriente que se desea monitorear hasta que alcanza una temperatura límite, relacionada con la corriente máxima admisible. Cuando esto sucede, acciona un contacto eléctrico que interrumpe el circuito. En este principio se basan, por ejemplo, los relés térmicos.

También se dispone de termostatos más sofisticados, construidos a base de termistores y otros tipos de sensores analógicos, que incorporan uno o varios comparadores y circuitos de acondicionamiento. Este tipo de dispositivos tienen la ventaja de ser regulables y utilizar sondas muy diminutas, lo cual permite localizarlos en el interior de bobinados, máquinas, recintos con atmósferas explosivas y otros tipos de ambiente donde se dispone de poco espacio o no se pueden admitir arcos eléctricos por razones de seguridad.

Resistencias detectoras de temperatura (RTD)

Las **RTD**, **figura 8.4**, son dispositivos basados en la variación normal que experimenta la resistencia de un conductor metálico puro con la temperatura, como resultado del cambio de su resistividad y sus dimensiones. Esta variación es directa, es decir, que si la temperatura aumenta o disminuye, la resistencia también aumenta o disminuye en la misma proporción. Se dice, entonces, que son dispositivos con **coeficiente de temperatura positivo** (PTC). Todos los metales puros exhiben este comportamiento. Sin embargo, no existen dos metales con el mismo coeficiente de temperatura. Por tanto, una vez conocidas las propiedades de un metal, puede ser establecida una curva de resistencia v.s. temperatura única para él.

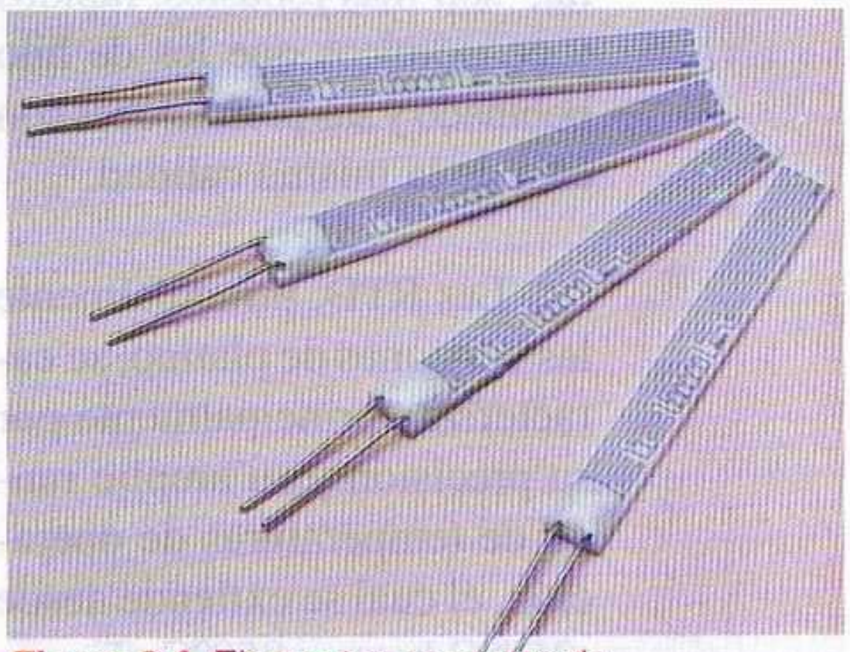


Figura 8.4. Elementos sensores de resistencias detectoras de temperatura (RTD). Los mostrados en la fotografía están hechos de película de platino

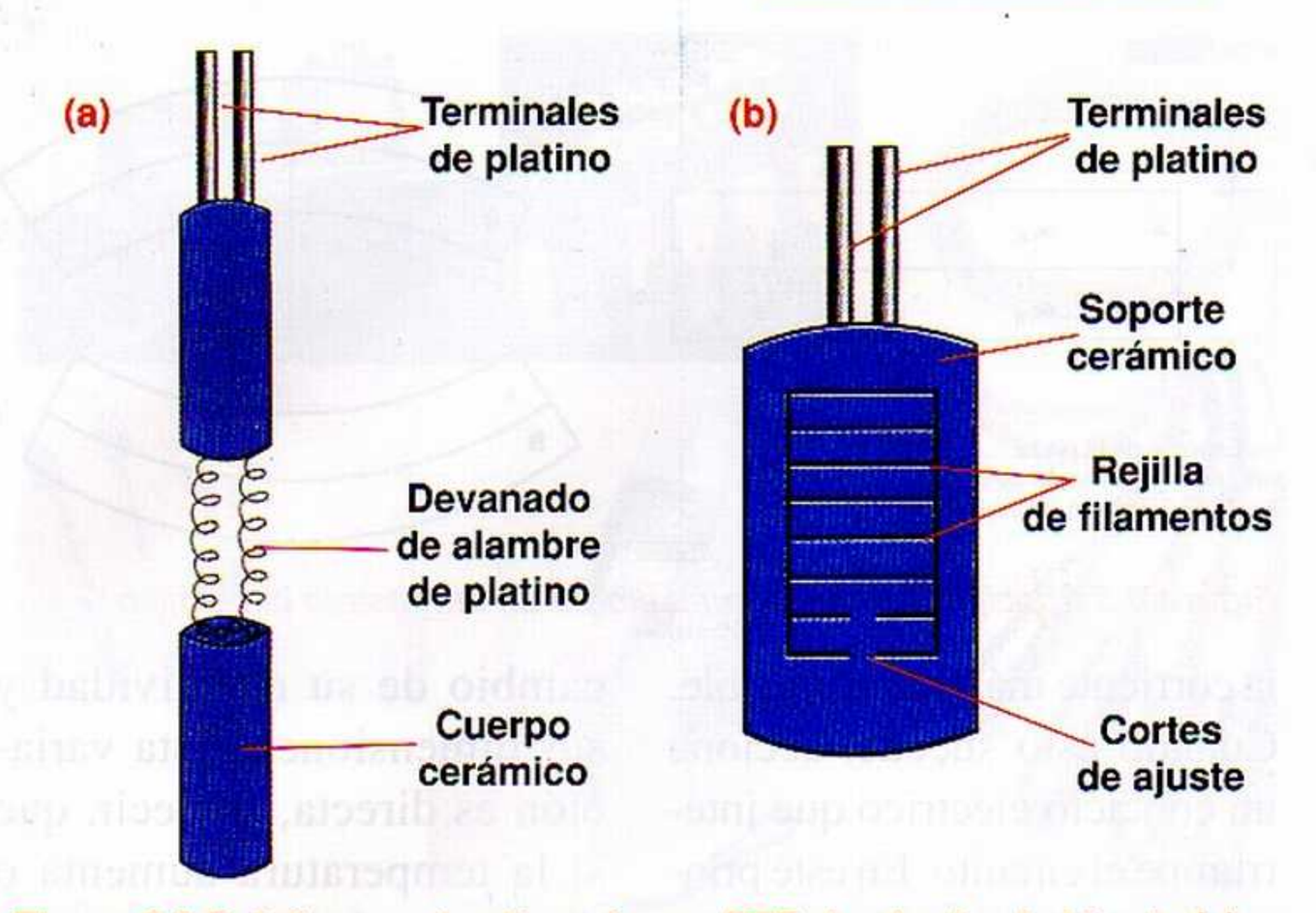


Figura 8.5 Detalles constructivos de una RTD de alambre bobinado (a) y de película metá lica (b)

El elemento sensor es típicamente un fino alambre de platino o una delgada película del mismo material aplicada a un sustrato cerámico, **figura 8.5**. Otros metales comúnmente utilizados como elementos sensores son: el níquel, el cobre y el molibdeno. En el primer caso, el alambre está devanado a través de unos diminutos agujeros sobre un soporte aislante de cerámica, mica o vidrio. Los sensores de película fina, en general, son más robustos, rápidos y económicos que los de hilo bobinado y sus prestaciones son casi de la misma calidad.

Las RTD, principalmente las versiones de platino, se caracterizan principalmente por su precisión y su amplio rango de temperaturas de operación, el cual se extiende desde -250ºC hasta +850ºC. Tienen también una sensibilidad, estabilidad y repetibilidad muy altas, y ofrecen una respuesta más lineal que las termocuplas o los termistores. Su principal desventaja, en el caso de las PRT, es el costo, el cual se incrementa debido a la necesidad de utilizar circuitos externos de procesamiento para conseguir una salida lineal. Obviamente, no se pueden medir temperaturas próximas ni superiores a la de fusión del elemento metálico.

En general, las sondas de níquel ofrecen una mayor sensibilidad que las de platino, pero su margen lineal, es decir, el rango donde la resistencia varía linealmente con la temperatura, es menor (-80ºC a 320ºC contra -200ºC a 850º C). Los valores nominales de resistencia (Ro) más comunes en los cuales se consiguen las sondas de platino son 25, 50 100, 200, 500 y 1000 Ω. Estos valores están definidos a 0ºC. Las populares sondas **Pt100**, por ejemplo, son RTD de platino con una Ro de 100 Ω. Valores típicos de Ro para las sondas de níquel son: 50, 100 y 120 Ω, y para las sondas de molibdeno son: 100, 200, 500, 1000 y 2000 Ω. Las de cobre, que trabajan en el rango de -70ºC a 150ºC, son generalmente de 10 Ω a 20ºC.

En cuanto a la disposición física, hay modelos diseñados tanto para la inmersión en fluidos como para la medición de temperaturas superficiales. Las primeras son normalmente de hilo bobinado, mientras que las segundas pueden ser de hilo o de película metálica. Ambos tipos son ampliamente utilizados en una gran variedad de situaciones industriales, **figura 8.6**, así como en automóviles, electrodomésticos, construcciones, dispositivos de protección contra sobrecorriente, arrancadores de motores, etc. Las RTD de platino se utilizan también en la llamada **anemometría de hilo caliente** para la medición de la velocidad de fluidos.

Figura 8.6 Utilización de una Pt100 de alambre bobinado para medir la temperatura superficial de un motor

Las RTD se utilizan generalmente con un acondicionador de señales que convierte su salida a un voltaje o a una corriente proporcional a la temperatura, **figura 8.7**. Esta señal de alto nivel puede ser entonces transmitida a una unidad de visualización, registro o control.

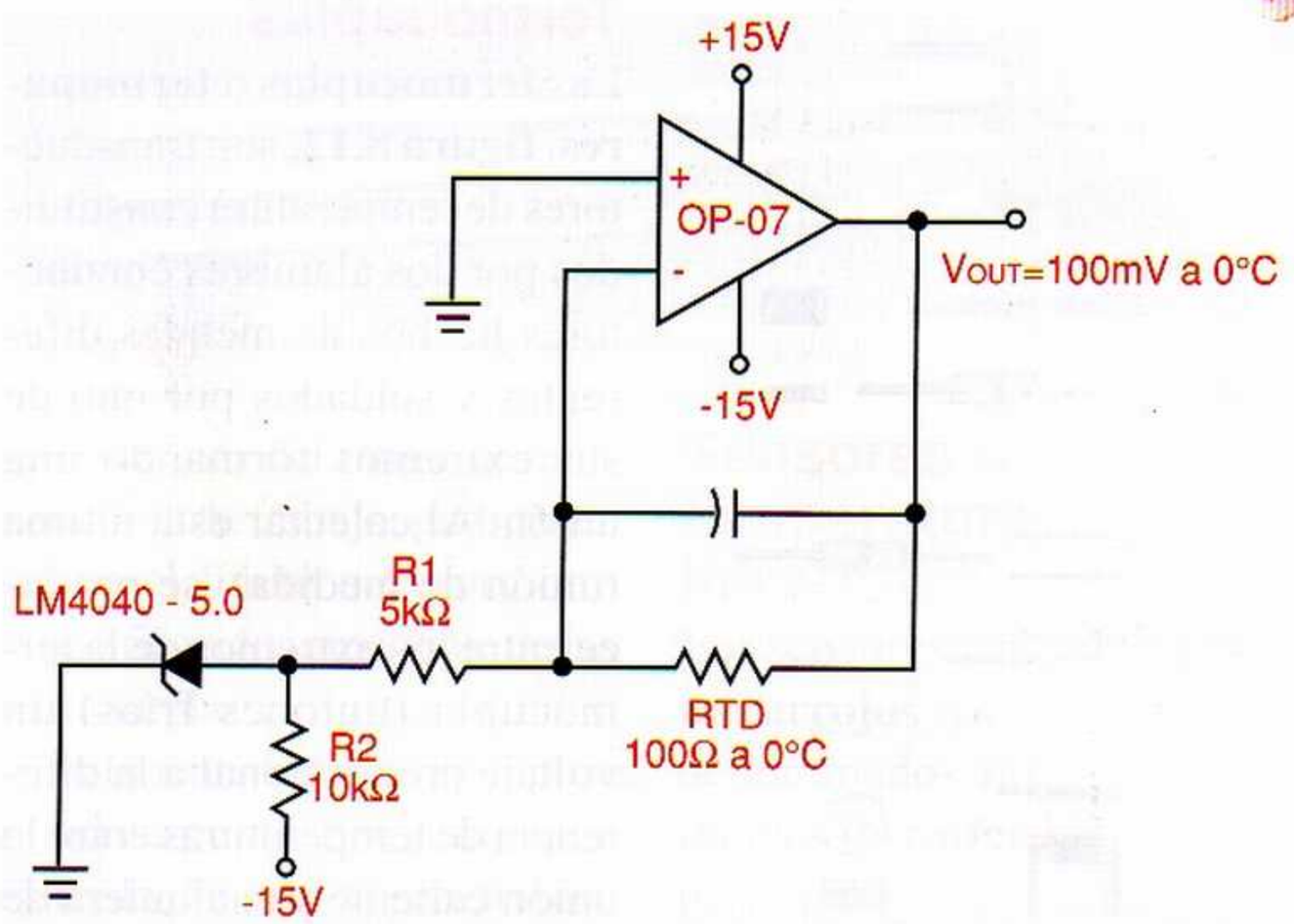


Figura 8.7 Ejemplo de un circuito acondicionador de señales para RTD. Con los valores indicados, el circuito ofrece una salida de 100 mV a 0º C

Termistores. 1P

Los **termistores, figura 8.8**, son dispositivos basados en óxidos metálicos semiconductores que exhiben un gran cambio en su resistencia eléctrica cuando se someten a cambios relativamente pequeños de temperatura. Pueden ser de coeficiente de temperatura positivo (PTC) o negativo (NTC), siendo estos últimos los más utilizados. Los termistores PTC (posistores) se construyen a base de óxidos de bario y titanio, y los NTC a base de óxidos de hierro, cobre, cromo, cobalto, manganeso y níquel dopados con iones de titanio o litio. Para altas temperaturas, se usan óxidos de itrio y circonio. También se dispone de termistores NTC basados en silicio y en películas de carbón.

Los termistores pueden adoptar una gran variedad de formas y tamaños, **figura 8.9**, llegando incluso a ser tan diminutos como la cabeza de un alfiler. El tipo de óxidos, las proporciones usadas, y el tamaño físico, determinan los rangos de resistencia y temperatura deseados para el dispositivo.

La mayoría de termistores se diseñan para trabajar en el rango de -50°C a 150°C, aunque en la práctica pueden abarcar desde -100°C hasta +500°C. Su resistencia base a 25°C (R_{25} o R_{TO}) está típicamente en el rango de 100Ω a 100kΩ, aunque también se fabrican termistores con valores de R_{25} tan bajos como 10Ω y tan altos como 40MΩ.

Los termistores ofrecen varias ventajas con respecto a las RTD y las termocuplas. Por ejemplo, son más económicos, estables y confiables, proveen un alto grado de intercambiabilidad, pueden hacerse lo suficientemente pequeños para permitir la medición puntual, facilitan la medición remota a través de cables largos y tienen una mayor sensibilidad o respuesta de señal, **figura 8.10**. Está última es típicamente del orden de -3%/ °C a -6%/ °C.

Los termistores son particularmente adecuados para aplicaciones de baja temperatura sobre rangos limitados, **figura 8.11**. Estas aplicaciones pueden estar basadas en el calentamiento externo del termis-

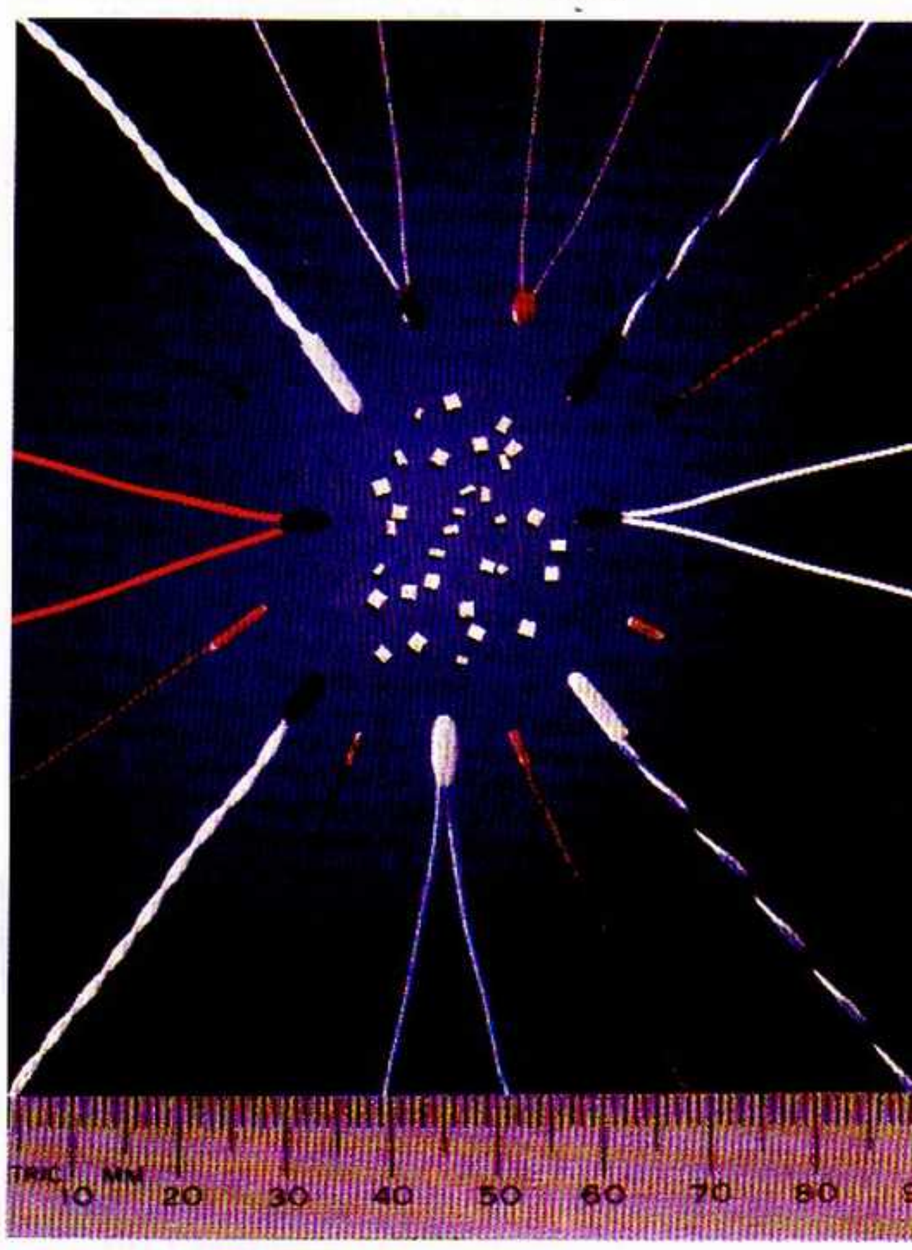


Figura 8.8 Elementos sensores típicos de termistores

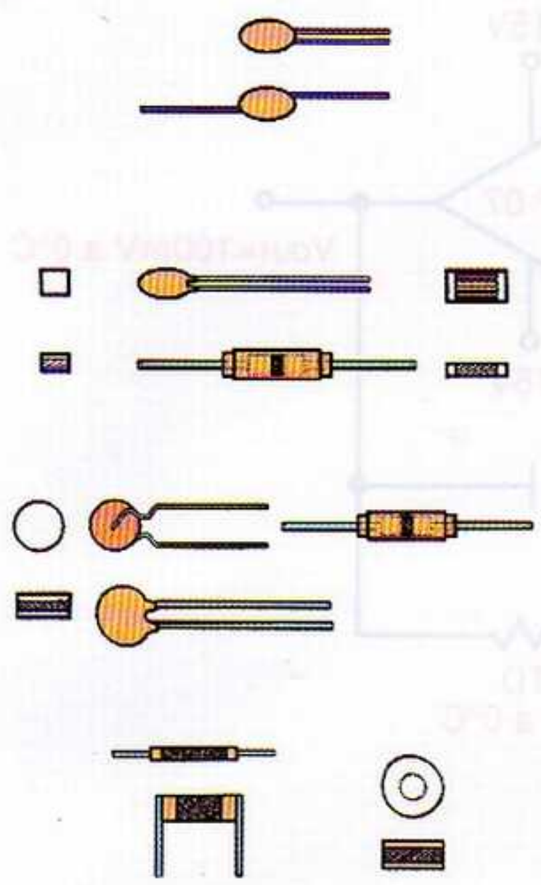


Figura 8.9 Formas usuales de presentación de los termistores

tor, que son todas las relativas a la medición, control, detección y compensación de temperatura, y las basadas en su **autocalentamiento** mediante la corriente de medición. Entre estas últimas, que implican la variación de la conductividad térmica del medio, figuran, por ejemplo, las medidas indirectas de caudal, nivel y vacío, así como el análisis de gases.

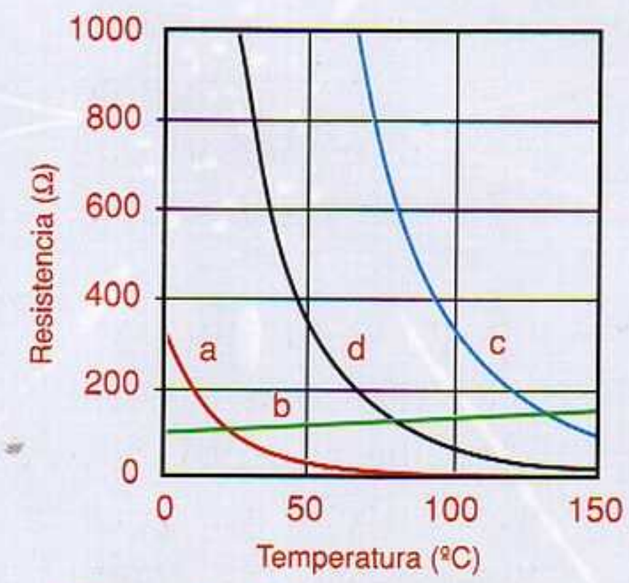


*Figura 8.10 Comparación de las curvas características R/T (resistencia contra temperatura) de termistores NTC típicos de **(a)** R25=100Ω, **(b)** R25=1kΩ y **(c)** R25=5 kΩ, y una Pt100 o RTD de platino de 100Ω **(d)***

Termocuplas

Las **termocuplas** o **termopares**, **figura 8.12**, son transductores de temperatura constituidos por dos alambres conductores hechos de metales diferentes y soldados por uno de sus extremos formando una unión. Al calentar esta última (unión de medida), se produce entre los extremos de la termocupla (uniones frías) un voltaje proporcional a la diferencia de temperaturas entre la unión caliente y cualquiera de las uniones frías, las cuales deben estar a una misma temperatura de referencia, generalmente 0ºC. Este fenómeno se conoce como **efecto termoeléctrico** o **Seebeck,** en honor de Thomas J. Seebeck, quien lo descubrió en 1822.

Los elementos de los termopares se fabrican a base de metales y aleaciones metálicas especiales, como platino (Pt), hierro (Fe), cobre (Cu), rodio (Rh), renio (Re), tungsteno (W), cromel (90%Ni/10%Cr), constantán (57%Cu/43%Ni), alumel (94%Ni/2%Al/3%Mn /1%Si), nicrosil (Ni-Cr-Si), nisil (Ni-Si-Mg), etc. Los mismos están protegidos mediante una funda o cubierta metálica, generalmente de acero inoxidable, cuyo espesor determina la velocidad de respuesta y la robustez de la sonda, **figura 8.13**.

Dependiendo de la combinación o calibración particular de metales utilizados, las termocuplas reciben diferentes nombres o designaciones (J, K, T, E, B, C, N, R, S, etc.). En la **tabla 8.1** se relacionan las características normalizadas de algunos de estos tipos, y en la **figura 8.14**, la forma como varía el voltaje de salida en función de la temperatura para los más comunes. Cada una de estas calibraciones tiene un rango de temperaturas diferente y limitaciones propias cuando se exponen a ciertos ambientes.

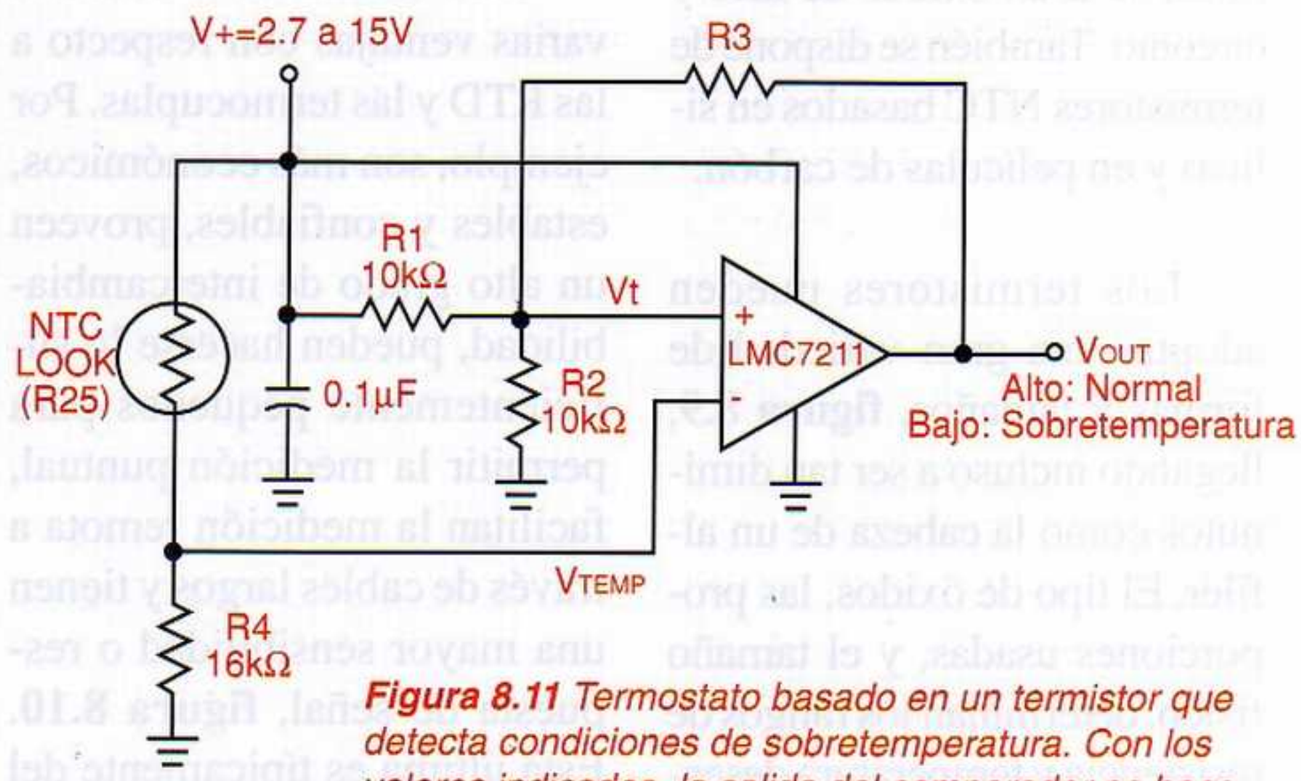


Figura 8.11 Termostato basado en un termistor que detecta condiciones de sobretemperatura. Con los valores indicados, la salida del comparador se hace baja cuando la temperatura supera los 80ºC.

Las termocuplas pueden ser también clasificadas de acuerdo al estilo de la unión de medida. Desde este punto de vista, se habla de termocuplas de unión expuesta, aterrizada o no aterrizada; dependiendo, respectivamente, de si la unión se extiende más allá de la cubierta metálica de protección, o está conectada o aislada eléctricamente a la misma, **figura 8.15**. Las **termocuplas de unión expuesta**, en particular, se emplean principalmente para realizar mediciones de temperatura en ambientes no corrosivos y donde se requieren tiempos de respuesta rápidos, particularmente gases estáticos o fluyentes no sometidos a altas presiones.

Las **termocuplas de unión aterrizada**, por su parte, permiten la medición de temperaturas estáticas o de gases o líquidos corrosivos en movimiento sometidos a altas presiones. Puesto que la unión está soldada a la cubierta, la respuesta térmica es más alta, pero también la susceptibilidad al ruido. Finalmente, las **termocuplas de unión no aterrizada**, se emplean para medir temperatura en ambientes corrosivos o ruidosos donde se requiera un buen aislamiento eléctrico y la velocidad de respuesta no sea crítica. Como aislantes se emplean óxido de magnesio (MgO), aceite, mercurio, alúmina (Al_2O_3), óxido de berilio (BeO), etc.

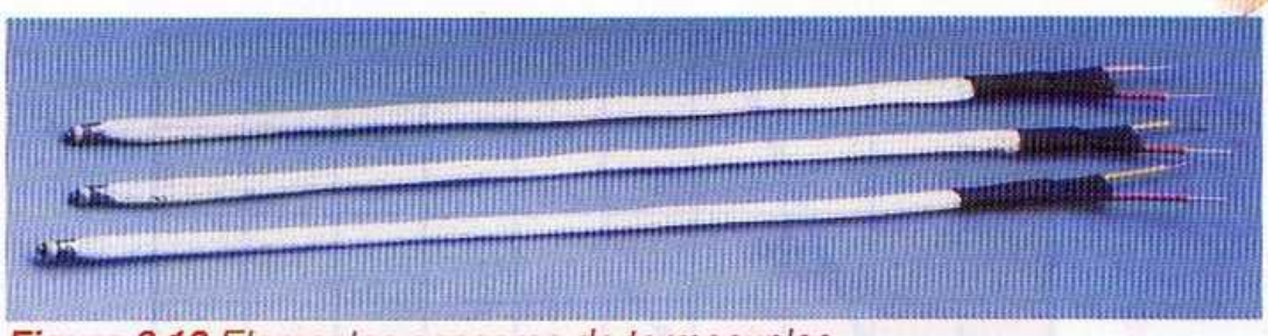


Figura 8.12 Elementos sensores de termocuplas

Además del rango de temperaturas de trabajo, particularmente el límite máximo, otra especificación importante de las termocuplas es su sensibilidad o coeficiente térmico, el cual es relativamente pequeño, por ejemplo, 50 mV/°C para termopares J. Por esta razón, las termocuplas deben ser utilizadas en conjunción con amplificadores de bajo *offset* para producir voltajes de salida útiles. De cualquier modo, la relación entre voltaje y temperatura no es absolutamente lineal en todo el rango de trabajo. Por tal razón, para obtener una buena precisión, deben emplearse circuitos que compensen las variaciones de temperatura en la unión fría. Esto implica el uso de un sensor adicional, digamos un termistor NTC o un sensor de silicio. Estos y otros aspectos prácticos relacionados con las termocuplas se examinan en el **proyecto 16** de este curso.

Sensores de temperatura infrarrojos

Los **sensores de temperatura infrarrojos** (IR), **figura 8.16**, denominados **también pirómetros de radiación**, son dispositivos de no contacto que miden indirectamente la temperatura de cuerpos calientes a partir de la radiación térmica emitida en forma natural por los mismos. Se utilizan en los casos en los cuales resulta imposible o peligroso el uso de un termistor, una termocupla u otro tipo de sensor de contacto. Es el caso, por ejemplo, de procesos industriales donde se manejan temperaturas muy superiores a las del punto de fusión del transductor, de cuerpos calientes muy pequeños, inaccesibles o en movimiento, de atmósferas de alto voltaje o que deben permanecer libres de contaminación, etc.

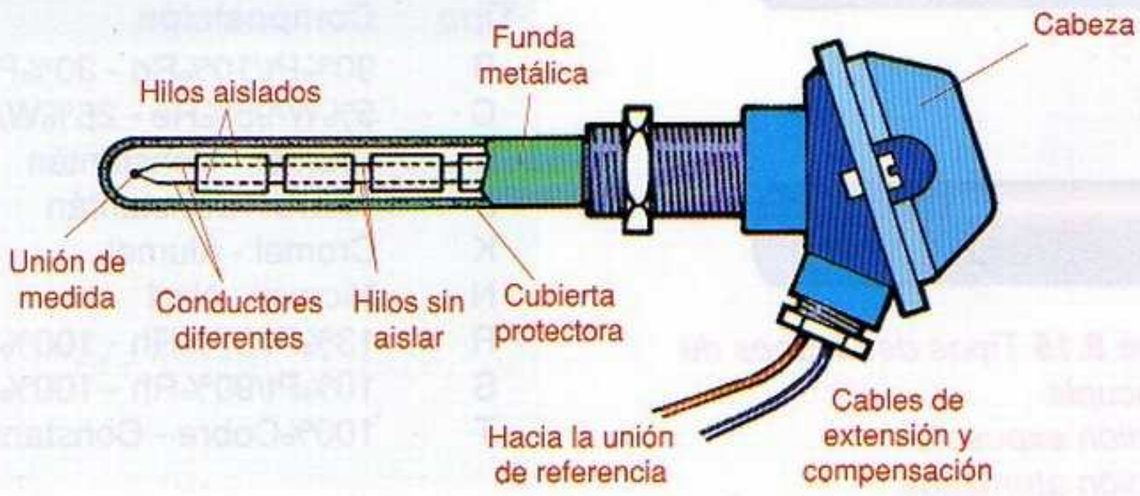


Figura 8.13 Partes de una termocupla industrial

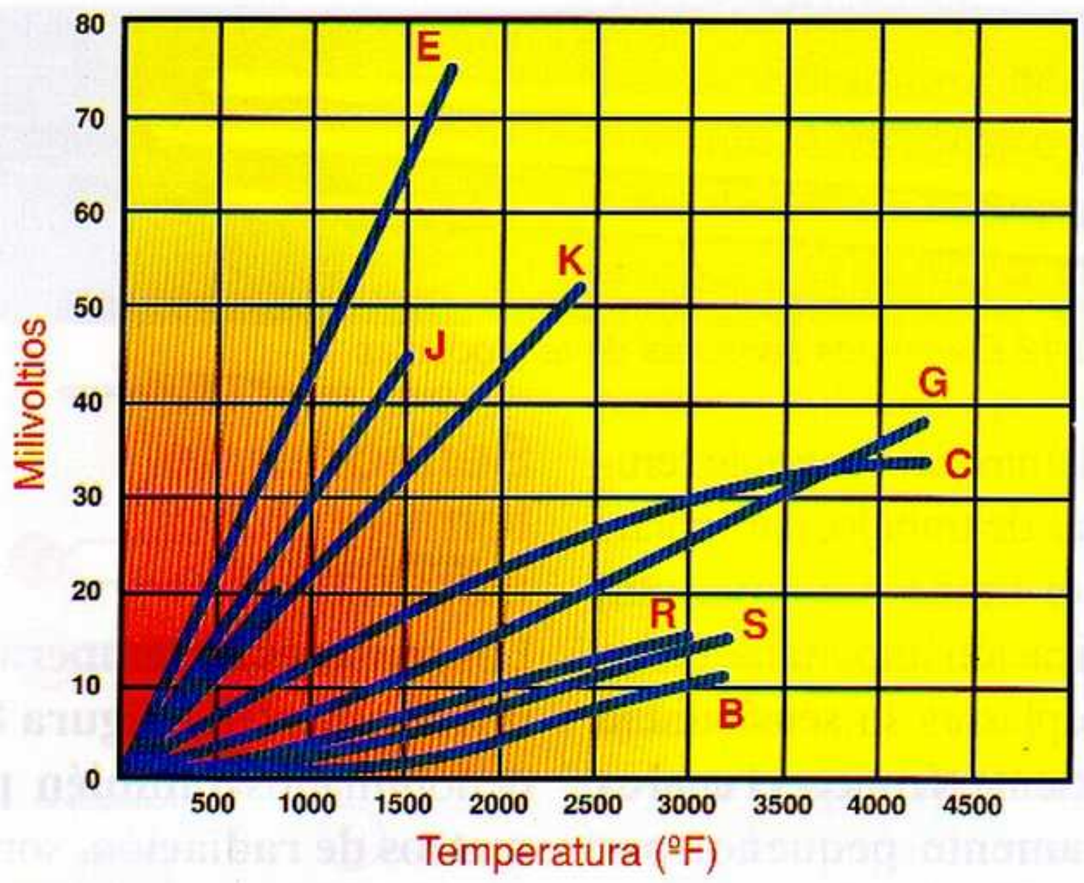


Figura 8.14 Curvas de respuesta características de termocuplas comerciales

Los sensores IR están basados en el concepto de que todos los cuerpos, a temperaturas por encima del cero absoluto (-273.5°C), producen radiación térmica en cantidad dependiente de su temperatura y sus propiedades físicas. Esta energía se incrementa a medida que el objeto se torna más caliente y puede ser evaluada a partir de la siguiente fórmula:

$$W = \varepsilon \sigma T^4$$

En esta expresión, denominada la Ley de Stefan-Boltzman, **W** representa la energía térmica total radiada por el cuerpo en todas las longitudes de onda, ε es la emisividad propia del cuerpo, σ la llamada constante de Stefan-Boltzman (5.6697×10^{-12} W/cm^{2}K^4) y **T** la temperatura absoluta del cuerpo radiante (°K). En este principio se basan los **pirómetros de radiación total** o de banda ancha, **figura 8.17a**, los cuales miden la energía emitida, reflejada y transmitida.

La superficie ideal para mediciones infrarrojas es un **cuerpo negro**, es decir un objeto con una emisividad igual a 1, lo cual implica que absorbe toda la energía incidente y emite radiación térmica en todas las longitudes de onda. La mayoría de objetos, sin embargo, no son radiadores tan perfectos, sino que reflejan y/o transmiten una porción de la energía que reciben, es decir tienen una emisividad inferior a 1, la cual depende de la longitud de onda, la temperatura, el estado físico y la constitución química de la superficie.

En general, entre más alta sea la emisividad de un objeto, más fácil es obtener una medición precisa de su temperatura por métodos infrarrojos.

En los sensores IR prácticos, **figura 8.17b**, la energía emitida, que es la que indica realmente la temperatura de un objeto, se captura mediante un detector apropiado, precedido de un sistema óptico, se amplifica y procesa mediante circuitos electrónicos.

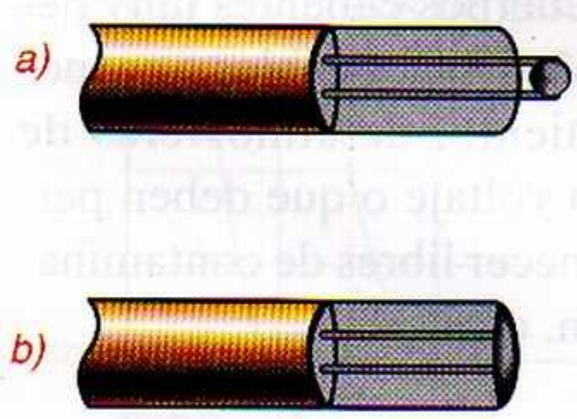


Figura 8.15 Tipos de uniones de termocupla
(a) Unión expuesta.
(b) Unión aterrizada.
(c) Unión no aterrizada.

Tipo	Composición	Rango (ºC)
B	90%Pt/10%Ro - 30%Pt/70%Rh	38 a 1800
C	5%W/95%Re - 26%W/74%Re	0 a 2300
E	Cromel - Constantán	0 a 982
J	Hierro - Constantán	0 a 760
K	Cromel - Alumel	-184 a 1260
N	Nicrosil - Nisil	-270 a 1300
R	13%Pt/87%Rh - 100%Pt	0 a 1593
S	10%Pt/90%Rh - 100%Pt	0 a 1538
T	100%Cobre - Constantán	-184 a 400

Tabla 8.1 Características normalizadas de termocuplas comunes

La función de la óptica es concentrar la energía y limitar la influencia de la radiación proveniente de otras fuentes distintas del objeto bajo medida. Esta es la parte más crítica del sistema y la que determina el campo de vista (FOV) de la unidad.

El detector, por su parte, se encarga de convertir la energía IR a una variable eléctrica medible, es decir un voltaje, una corriente o una resistencia equivalente. Incluye típicamente un filtro espectral para limitar la energía a una banda estrecha.

El amplificador debe resolver y amplificar las débiles señales de salida enviadas por el detector, las cuales pueden ser, por ejemplo, del orden de 1 mV/°C. Una vez obtenida una señal estable y manejable, la misma debe ser linealizada, es decir convertida en una función lineal de la temperatura y representada como una corriente de 4-20 mA, un voltaje de 0-5 V, una señal digital, etc.

Actualmente se dispone también de sensores de temperatura IR **inteligentes**, los cuales pueden ser programados para comunicarse entre sí y con computadoras en una planta de manufactura. De este modo se facilita el direccionamiento, la configuración, la actualización y el mantenimiento de las unidades desde sitios remotos durante su instalación y operación.

Sensores de temperatura de silicio

Los sensores de silicio, **figura 8.18**, son circuitos integrados que aprovechan la variación predecible del voltaje de la unión base-emisor (V_{BE}) de los transistores bipolares para realizar mediciones confiables y exactas de temperatura. Se caracterizan por su pequeño tamaño y son especialmente apropiados para aplicaciones de medición y control de temperatura en el rango de -55°C a +150°C. Además, no requieren de etapas de linealización, amplificación ni compensación externas debido a que incorporan en la misma pastilla sus propios circuitos de procesamiento de señales.

La mayoría de sensores de silicio proporcionan como salida un voltaje que varía linealmente con la temperatura en grados Kelvin (°K), Celsius (°C) o Fahrenheit (°F). Algunos ejemplos representativos son el LM34, el LM35, el LM135 y el LM50, todos ellos de National Semiconductor y con una sensibilidad nominal de 10mV por grado. El LM50, en particular, tiene incorporado intencionalmente un *offset*

Figura 8.16 *Termómetro de no contacto basado en un sensor IR*

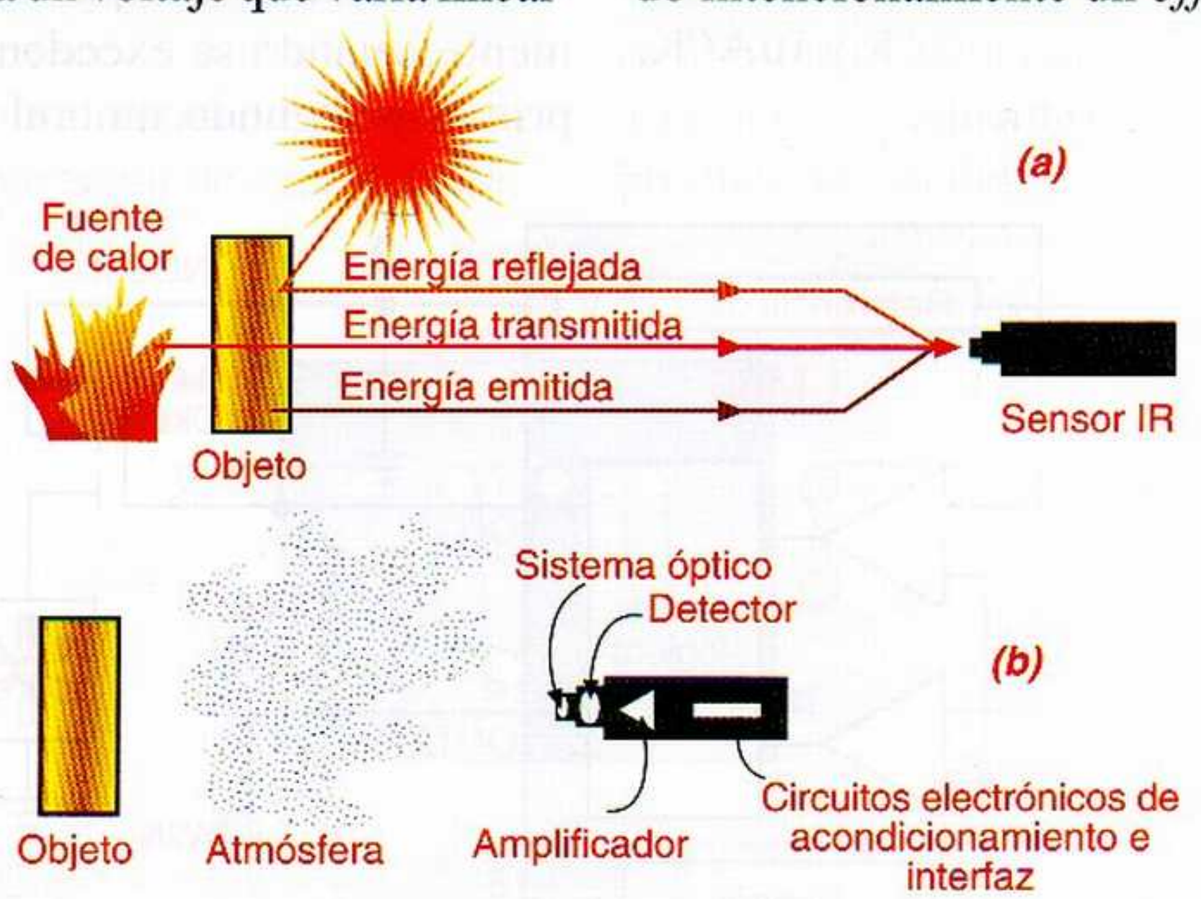


Figura 8.17 *Los sensores de temperatura IR leen la energía reflejada, transmitida o emitida desde un objeto. Únicamente la energía emitida indica la temperatura del mismo*
(a) *Principio de funcionamiento.*
(b) *Estructura funcional.*

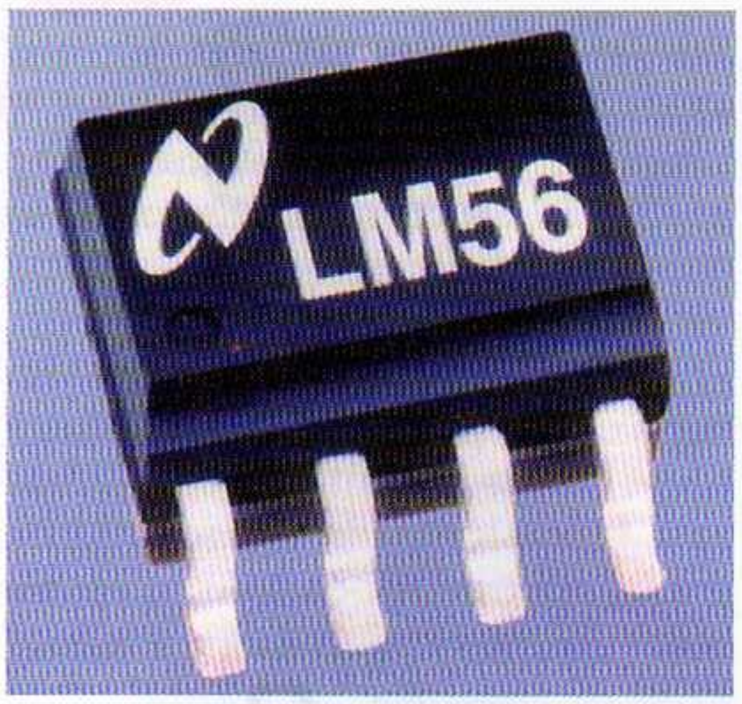


Figura 8.18 Transductor de temperatura de silicio representativo. El dispositivo mostrado (LM56), es fabricado por National Semiconductor (www.natsemi.com); detecta temperaturas entre -55ºC y +150ºC y ofrece una salida digital on-off.

DC de +500 mV para facilitar la medición de temperaturas negativas en sistemas de fuente sencilla. También se dispone de sensores con salida por corriente. Dos ejemplos representativos son el LM334 y el AD590, cuyas sensibilidades típicas son 1 mA/ºK y 1µA/ºK, respectivamente.

La integración de circuitos de procesamiento en los sensores de temperatura de silicio elimina también, en muchos casos, la necesidad de comparadores o de convertidores A/D externos para convertir la salida análoga a un nivel lógico o un código digital. Los sensores de salida por comparador, en particular, son muy útiles para detectar condiciones de falla, impulsar calefactores o enfriadores, y otras aplicaciones de control y alarma. En la **figura 8.19**, por ejemplo, se muestra un sencillo circuito de control para un ventilador utilizando un sensor de salida por comparador **LM56**. Los voltajes de referencia para los comparadores internos son determinados por R1-R3.

En este caso, las salidas OUT1 (pin 7) y OUT2 (pin 6) se hacen bajas, respectivamente, cuando se exceden el primer y segundo umbral de temperatura fijados. En el primer caso, se energiza el ventilador de enfriamiento, mientras que en el segundo se produce una señal de corte o *shutdown* para impedir el daño del sistema. También se dispone de sensores monolíticos inteligentes, con un nivel de integración más elevado, los cuales incluyen convertidores A/D, multiplexores, referencias de voltaje, entradas/salidas digitales, lógica de detección de fallas, registros para el almacenamiento de datos e instrucciones, y otras funciones.

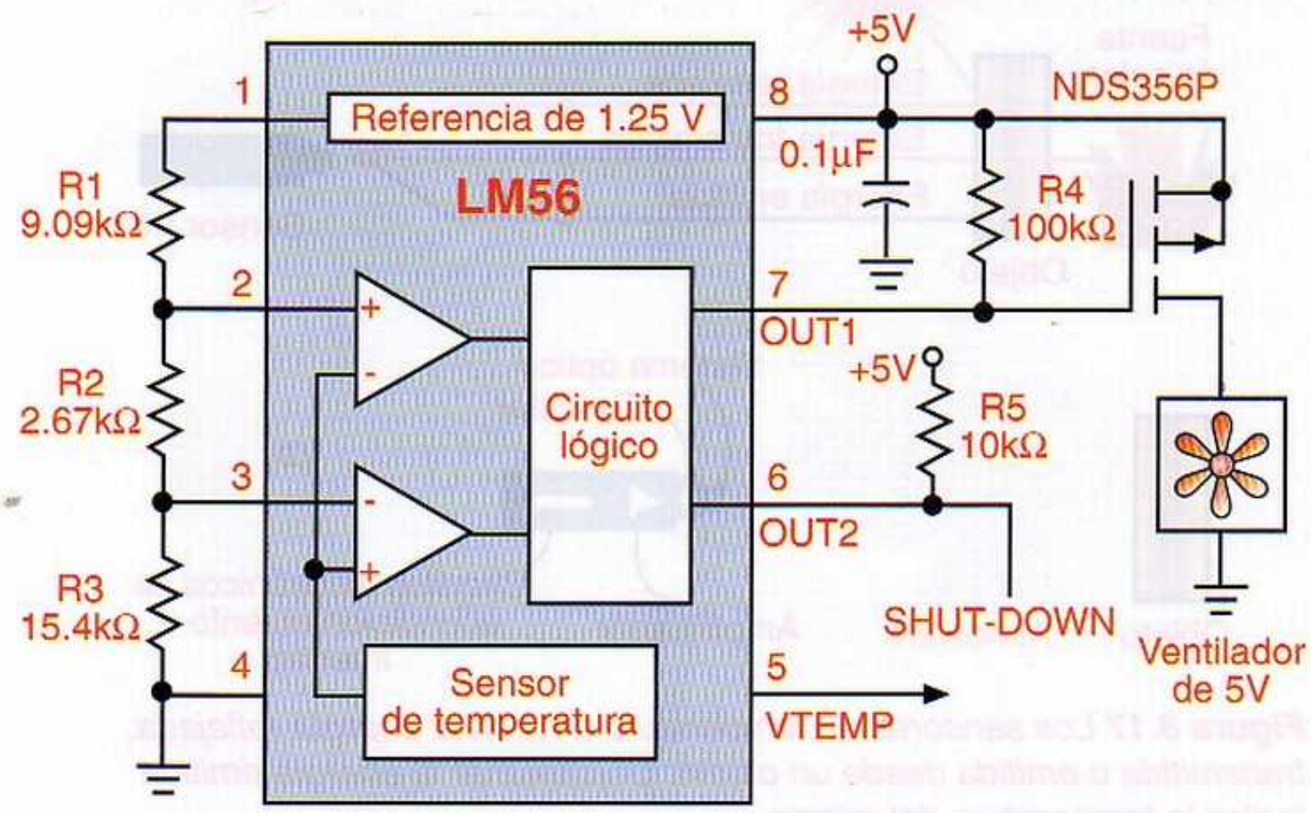


Figura 8.19 Circuito de control de temperatura con sensor de salida por comparador LM56

Un ejemplo representativo de sensores de este tipo es el **LM75**, dotado de un convertidor A/D delta-sigma de 9 bits, el cual proporciona una resolución de 0,5ºC por bit para mediciones de temperatura desde -25ºC hasta +150ºC. También posee una interfaz digital de dos hilos compatible con I²C y una salida de drenador abierto, configurable como línea de interrupción, que indica cuando los umbrales de temperatura programados han sido excedidos. Adicionalmente, hay tres pines de selección que permiten direccionar hasta 8 sensores del mismo tipo sobre un mismo bus de dos hilos. Otros sensores de temperatura monolíticos avanzados muy populares son el **DS1620** y el **DS1820**, basados en la interfaz 1-Wire de la firma Dallas Semiconductor (www.dalsemi.com). Ω

Capítulo 9

Sensores de humedad y punto de rocío

La humedad es una variable de gran importancia en la industria, no sólo porque muchos procesos deben ser ejecutados bajo condiciones controladas de humedad, sino porque ella afecta la calidad de muchos productos y la seguridad de las personas. En este capítulo se examinan los conceptos básicos relacionados con la humedad y las principales tecnologías de sensores utilizadas para su medición.

Generalidades

La **humedad**, definida como la cantidad de vapor de agua presente en un gas o de agua impregnada o absorbida por un cuerpo, determina la calidad de muchos procesos y productos industriales. Por ejemplo, en ciertos procesos textiles, **figura 9.1**, la banda de material textil debe pasar a través de una cámara de humectación para humedecerla y suavizarla. La humedad de la cámara se mantiene rociando agua en un conducto por el que circula aire; se monitorea mediante un sensor de humedad y se regula mediante una válvula proporcional en la línea de suministro de agua. El sensor de humedad es necesario, puesto que la tira textil, al entrar seca y salir mojada de la cámara, remueve constantemente vapor de agua del aire.

Otro parámetro importante relacionado con la humedad es el **punto de rocío**, referido a la temperatura a la cual se produce la condensación del

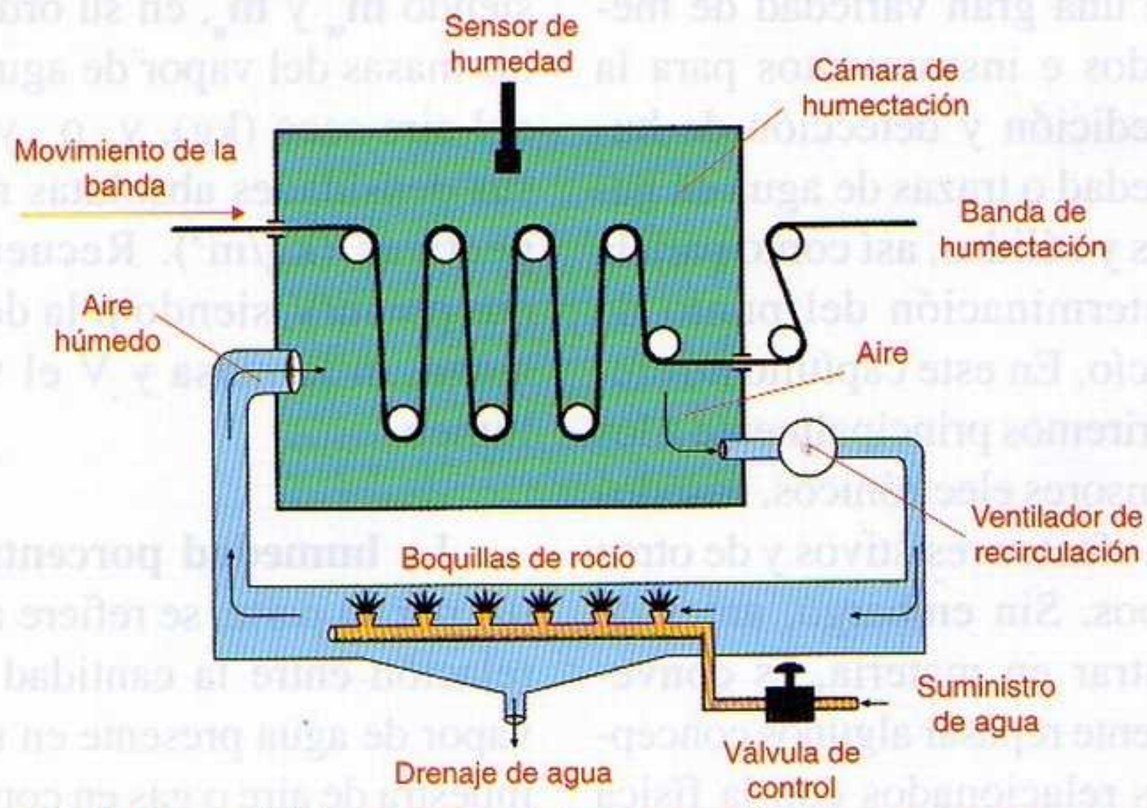


Figura 9.1 La humedad juega un papel clave en muchos procesos y operaciones industriales, como este sistema de humectación de bandas textiles.

Figura 9.2 Instrumentos y sensores para la medición de humedad

vapor de agua. Aunque algunas veces los efectos negativos del rocío, como la formación de moho u orín, pueden ser minimizados colocando una cubierta de protección sobre la superficie expuesta, existen muchas situaciones donde esto no es posible. En los sistemas de calefacción, por ejemplo, el rocío puede formar depósitos de agua estancada en el fondo de los ductos, los cuales actúan como incubadores de hongos, moho y microorganismos causantes de enfermedades.

Actualmente se dispone de una gran variedad de métodos e instrumentos para la medición y detección de humedad o trazas de agua en gases y sólidos, así como para la determinación del punto de rocío. En este capítulo nos referiremos principalmente a los sensores electrónicos, basados en efectos resistivos y de otros tipos. Sin embargo, antes de entrar en materia, es conveniente repasar algunos conceptos relacionados con la física de la humedad.

Conceptos básicos

La cantidad de vapor de agua contenida en el aire o un gas, bajo determinadas condiciones de temperatura y presión, se expresa normalmente en una de estas tres formas: humedad absoluta, porcentaje de humedad o humedad relativa. La **humedad absoluta** o **específica** (ω) se refiere a la masa de vapor de agua presente en una masa dada de aire o gas. Se especifica en kilogramos por kilogramo (kg/kg) y se evalúa así:

$$\omega = m_w/m_a = \rho_w/\rho_a$$

siendo $\mathbf{m_w}$ y $\mathbf{m_a}$, en su orden, las masas del vapor de agua y del aire seco (kg), y ρ_w y ρ_a sus densidades absolutas respectivas (kg/m^3). Recuerde que $\rho = m/V$, siendo ρ la densidad, m la masa y V el volumen.

La **humedad porcentual** (μ) por su parte, se refiere a la relación entre la cantidad de vapor de agua presente en una muestra de aire o gas en condiciones reales, es decir la humedad absoluta (ω), y la cantidad máxima de vapor de agua que puede contener la misma muestra antes de colapsar, es decir la **humedad de saturación** (ω_{sat}). Se expresa como un porcentaje. Por tanto:

$$\mu = (\omega/\omega_{sat}) \times 100$$

En general, el punto de saturación del vapor de agua se incrementa a medida que aumenta la temperatura del aire, y disminuye a medida que se incrementa la presión.

Finalmente, la **humedad relativa** o RH (*relative humidity*), que representaremos como ϕ, se refiere a la relación entre la presión parcial del vapor de agua (Pw) a una temperatura dada (To) y la presión total del mismo en condiciones de saturación (Psat), a la misma temperatura. Se expresa como un porcentaje y es numéricamente igual al porcentaje de humedad. Esto es:

$$\phi = (P_w/P_{sat}) \times 100$$
$$= (\rho_w/\rho_{sat}) \times 100$$

Siendo ρ_w y ρ_{sat} la densidad del vapor de agua en condiciones normales y de saturación, respectivamente. Las presiones Pw y Psat se expresan generalmente en milibares. La humedad relativa es la forma más común de expresar el contenido de vapor de agua en una muestra de aire o gas.

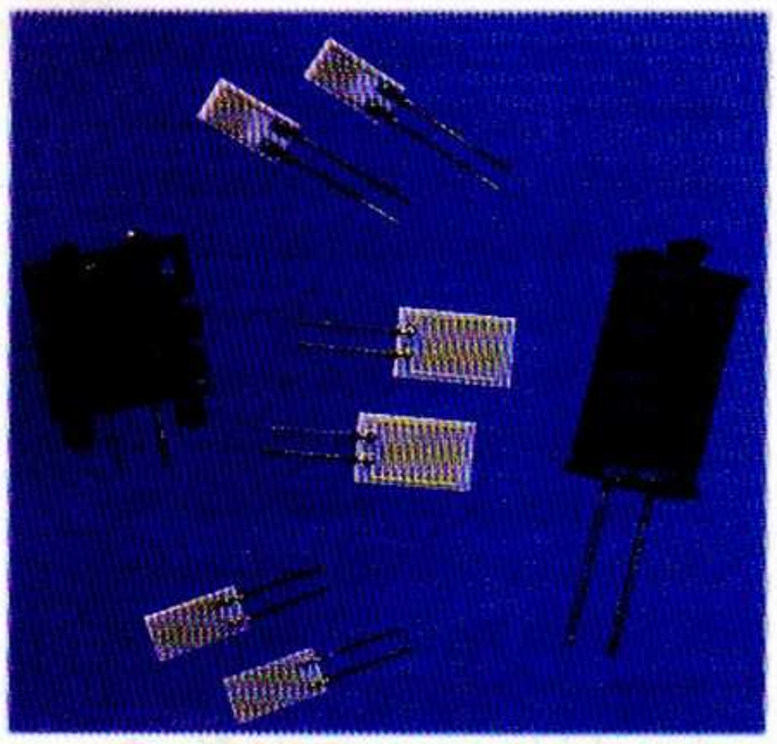


Figura 9.3 Sensores de humedad resistivos y capacitivos de bajo costo. Los mostrados en la fotografía son fabricados por General Eastern (www.geinet.com)

Tipos de sensores de humedad

Actualmente se dispone de varias tecnologías de sensores de humedad, la mayoría basadas en la tendencia de ciertos materiales a cambiar sus propiedades físicas o eléctricas de una manera predecible cuando varía su contenido de vapor de agua. Éstas incluyen principalmente sensores mecánicos, resistivos, cerámicos, capacitivos, poliméricos, de condensación en espejo, criogénicos, de temperatura dual, monolíticos, etc.

Los **sensores mecánicos** están basados en el efecto que tiene la absorción de agua sobre las propiedades físicas de ciertos materiales, principalmente la longitud o la masa. Por ejemplo, algunos tipos de fibras, como el cabello humano o el nylon, se expanden o contraen cuando absorben agua. En este principio se basan los **humistatos** o interruptores controlados por humedad. La precisión de este tipo de instrumentos es del orden del ±3% al ±5% y pueden medir niveles de humedad relativa desde el 19% hasta el 95%. Los medidores de humedad basados en cambios de longitud se denominan genéricamente **higrómetros de extensión**, y los basados en cambios de masa **higrómetros de absorción**.

Los **sensores resistivos y capacitivos, figura 9.3**, se basan en la propiedad que presentan ciertos materiales aislantes de cambiar su resistividad y/o su constante dieléctrica de acuerdo a su contenido de humedad. Si se mide la variación de su resistencia, se tiene un higrómetro resistivo o **humistor**. Si se mide la variación de capacitancia, se tiene un higrómetro capacitivo.

Lo **sensores resistivos** están formados generalmente por dos electrodos de cinta metálica realizados en forma de zigzag sobre una forma de plástico (sustrato) y aislados eléctricamente entre sí, **figura 9.4**. Todo el conjunto está recubierto por una solución acuosa de cloruro de litio (LiCl) u otro tipo de sal higroscópica (F_2B_a, P_2O_5, etc). Esta sal tiene la propiedad de variar considerablemente su resistencia al aumentar o disminuir la humedad ambiente, ya que libera o absorbe iones de la película metálica de soporte.

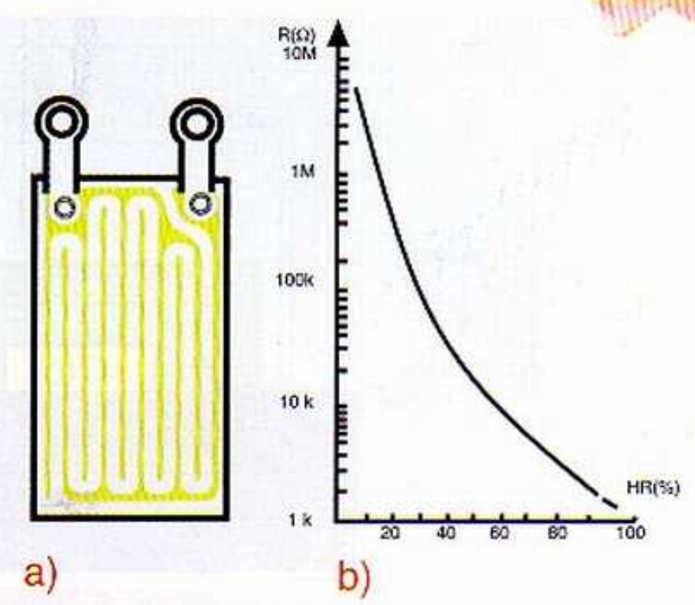


Figura 9.4 Sensores de humedad resistivos. (a) Aspecto físico. (b) Variación de la resistencia en función de la humedad

Este tipo de instrumentos ofrecen precisiones del ±2% al ±3%, y pueden medir humedades relativas desde el 5% hasta el 95%. No deben ser utilizados en atmósferas contaminadas con sal o polvo excesivo, ni ambientes de dióxido de azufre, vapores ácidos, amoníaco, cloro, vapores alcalinos, acetileno, óxido de etileno y otros gases. Tampoco deben exponerse a humedades relativas por encima de la máxima especificada por el fabricante.

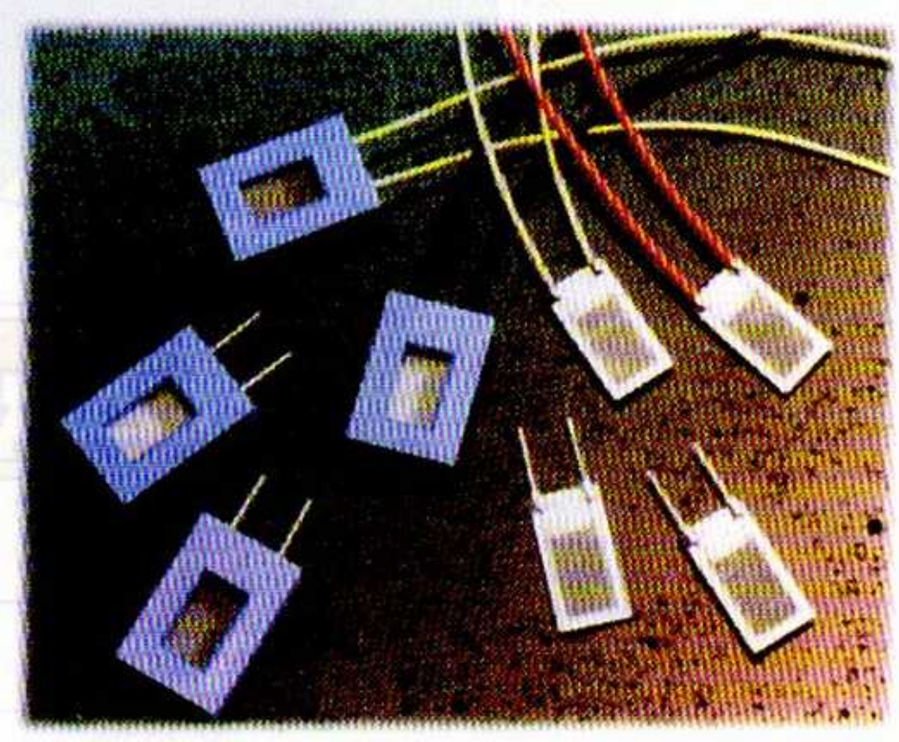


Figura 9.5 Sensores de humedad cerámicos. Los mostrados en la fotografía corresponden a la serie ERH 300 de Elmwood Sensors Inc. (www.elmwood sensors.com)

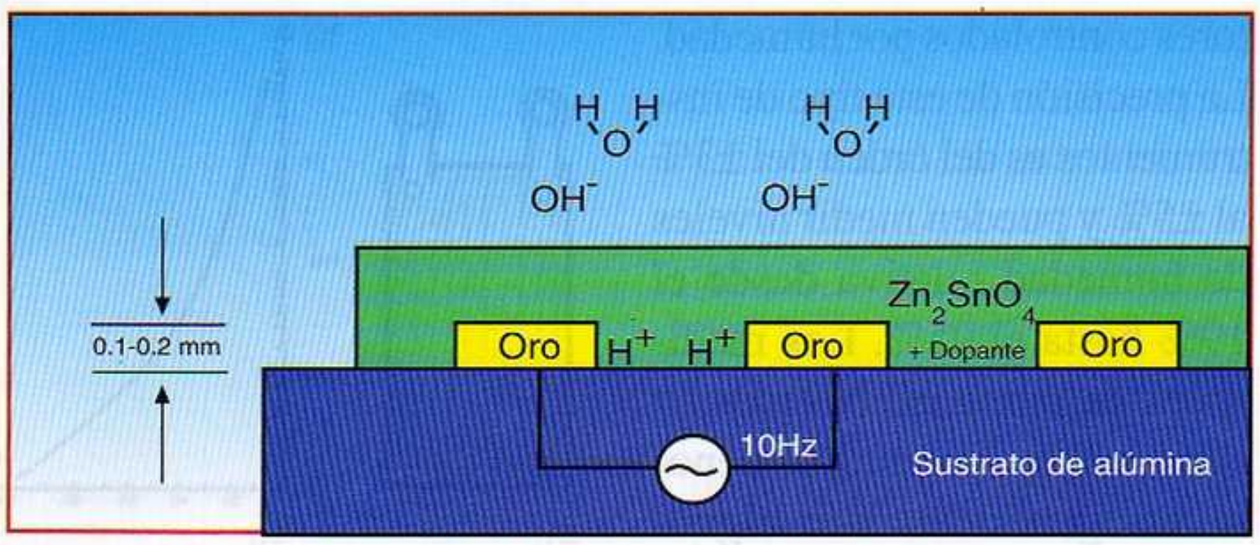


Figura 9.6 Estructura y principio de funcionamiento de un sensor de humedad cerámico

Una variante son los **sensores cerámicos**, formados por un sustrato de alúmina (Al_2O_3) impreso con huellas de oro y cubierto por una delgada capa de Zn_2SnO_4 dopado. Un ejemplo son los sensores de la serie **ERH 300**, **figura 9.5**, los cuales operan sobre un rango de humedades relativas del 10% al 90%. En la **figura 9.6** se ilustra la estructura interna y el principio de funcionamiento de este tipo de dispositivos.

En este caso, el dopante descompone las moléculas de agua depositadas sobre su superficie en iones H+ y OH-, variando su resistencia. Esta última puede fluctuar desde 25.6 MΩ (RH=10%) hasta 390Ω (RH=90%). Debido a que el dopante no requiere una absorción completa de agua y no degrada las propiedades dieléctricas, se garantizan un tiempo de respuesta muy corto y una larga vida útil.

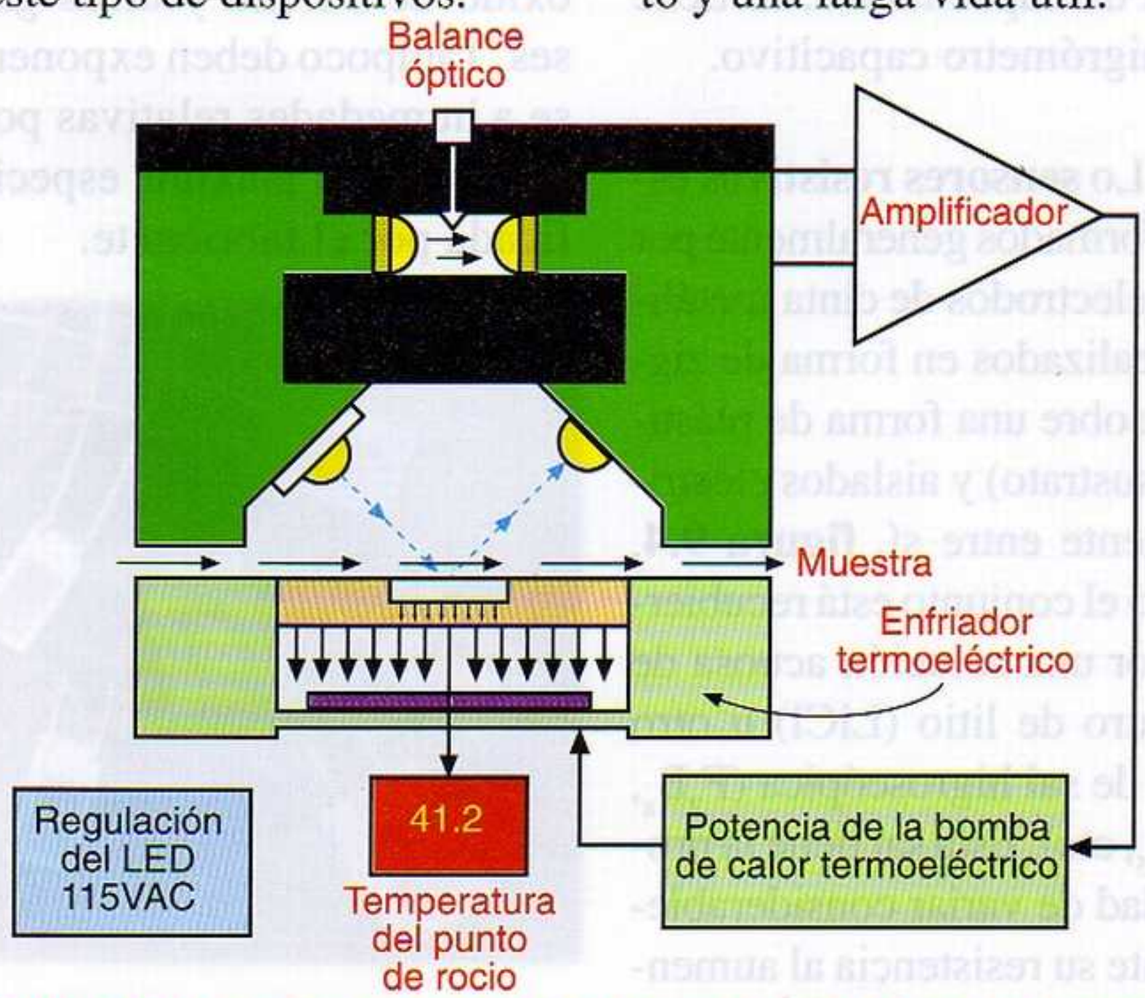


Figura 9.7. Estructura y principio de funcionamiento de un higrómetro de espejo empañado convencional. Típicamente, la superficie reflectiva del espejo es de cobre con un baño de oro o plata. Como enfriador se utiliza un módulo termoeléctrico. La fuente primaria de luz es un LED de alta intensidad.

Los **sensores capacitivos** detectan cambios en las propiedades dieléctricas de ciertos materiales inducidos por la presencia de humedad. Están formados por una película aislante con características higroscópicas (dieléctrico) recubierta de una capa metalizada sobre ambos lados. Las moléculas de vapor de agua absorbidas por la película cambian su constante dieléctrica, produciendo un cambio correspondiente en la capacitancia. Este tipo de dispositivos, que constituyen junto con los sensores resistivos y cerámicos una gran parte del mercado de los sensores de humedad, ofrecen niveles de precisión entre ±2% y ±15%, y miden humedades relativas desde el 0% hasta el 45%.

Los **sensores poliméricos** son similares en su construcción y forma a los sensores resistivos y cerámicos, pero se basan directamente en los cambios de resistividad del sustrato (un polímero) y no necesitan de una película higroscópica. Este comportamiento se consigue tratando químicamente la superficie de detección. El sustrato es generalmente una base de poliestireno tratada con ácido sulfúrico. Su exactitud es del orden del ±2% al ±10% y su rango de medición de humedad relativa se extiende desde menos del 30% hasta más del 90%.

Los **sensores de espejo empañado** (***chilled mirror***), **figura 9.7**, detectan humedad enfriando inicialmente la superficie reflectiva de un pequeño espejo hasta alcanzar el punto de rocío, es decir la formación de gotas de agua condensada sobre la misma. Simultáneamente, se dirige un haz de luz en dirección a la superficie empañada y se detecta mediante un sensor óptico la cantidad de luz reflejada. Esta última es alta cuando el espejo está seco, es decir, su temperatura superficial está por encima del punto de rocío, pero disminuye a medida que el agua formada en la superficie refracta luz. El incremento en la cantidad de luz refractada proporciona una medición precisa del incremento en la humedad.

Este tipo de higrómetros son muy precisos y, por la misma razón, costosos. Se utilizan principalmente como instrumentos de laboratorio y en aplicaciones industriales donde se requiere una gran exactitud. Sus principales dificultades son: la sensibilidad del espejo al polvo y otros contaminantes, lo cual afecta la lectura del detector; y el incremento significativo del tiempo de respuesta a temperaturas por debajo de -40ºC, el cual puede llegar a ser inclusive de varias horas.

Para solucionar este último inconveniente, se han desarrollado los llamados **higrómetros criogénicos, figura 9.8**, en los cuales el espejo se enfría inicialmente mediante nitrógeno líquido (LN_2) hasta que se forma una capa de condensación y luego se calienta hasta que se obtiene la capa de rocío o escarcha deseada. La temperatura a la cual esto sucede (punto de rocío o escarcha) se mide con un termistor y se controla electrónicamente.

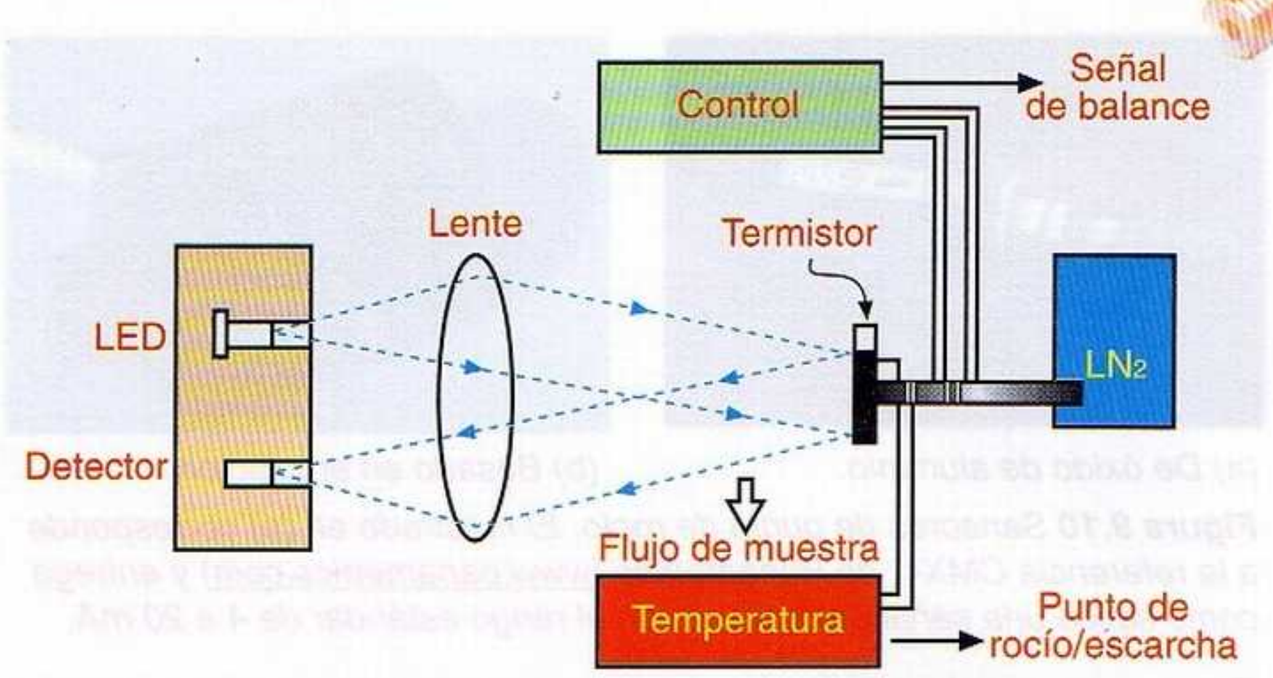


Figura 9.8 *Principio de funcionamiento de un higrómetro de espejo empañado criogénico. Este tipo de dispositivos proporcionan medidas muy rápidas y exactas de los puntos de rocío y escarcha, desde 30ºC hasta -105ºC y menos.*

También se dispone de higrómetros **monolíticos** o **integrados**, los cuales incluyen, en una misma cápsula, el sensor de humedad propiamente dicho y los circuitos de acondicionamiento de señales correspondientes. Un ejemplo es el **HIH-3605** de Honeywell, **figura 9.9**, el cual produce como salida un voltaje relacionado linealmente con la humedad relativa.

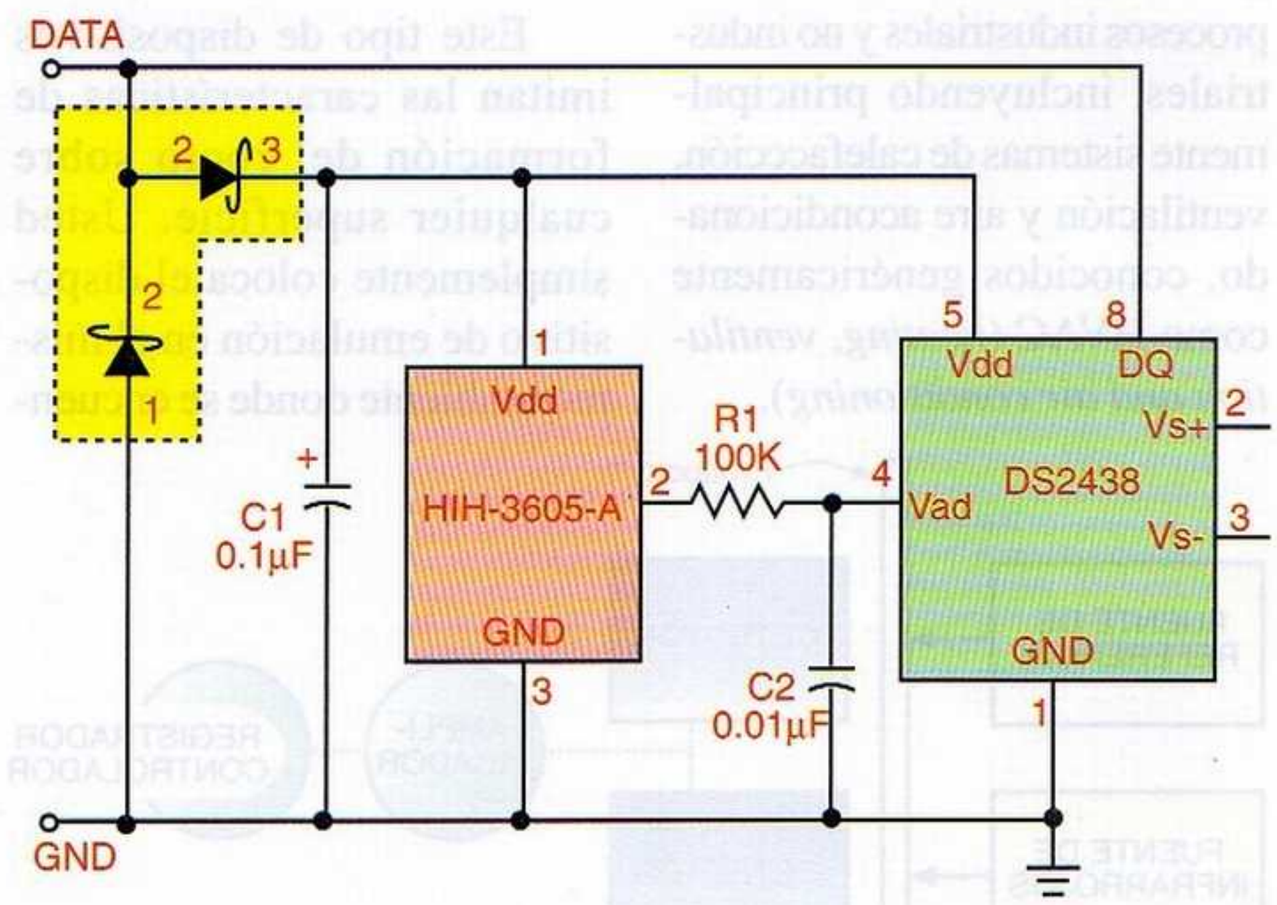


Figura 9.9 *Medidor de humedad relativa práctico, con sensor **HIH-3605**. Este último se alimenta con una tensión parásita de +5V derivada del bus 1-Wire y proporciona voltajes de salida DC en el rango de 0.8V a 3.9V, a medida que la humedad relativa varía desde el 0% hasta el 100%*

(a) De óxido de aluminio.

(b) Basado en emulación.

Figura 9.10 *Sensores de punto de rocío. El mostrado en* ***(a)*** *corresponde a la referencia CMX-1 de Panametrics (www.panametrics.com) y entrega como salida una señal de corriente en el rango estándar de 4 a 20 mA.*

Sensores de punto de rocío

El **punto de rocío** o *dew point* es la temperatura límite a la cual el vapor de agua existente en el aire o el gas bajo prueba se condensa o pasa al estado líquido. En otras palabras, es la temperatura a la cual la humedad relativa es del 100%, es decir, la presión del vapor de agua es igual a la presión de saturación. Por tanto, a la temperatura de punto de rocío, un gas está siempre saturado. Esta variable es de gran importancia en muchos procesos industriales y no industriales, incluyendo principalmente sistemas de calefaccción, ventilación y aire acondicionado, conocidos genéricamente como HVAC (*heating, ventilation and air conditioning*).

Para la medición y detección del punto de rocío se emplean sensores basados en principios similares a los de los sensores de humedad antes examinados, incluyendo películas poliméricas, sistemas de condensación en espejo, haces infrarrojos, sales higroscópicas y sustratos de óxido de aluminio, **figura 9.10a**. Otra alternativa es utilizar sensores basados en el principio de **emulación**, como el mostrado en la **figura 9.10b.**

Este tipo de dispositivos imitan las características de formación del rocío sobre cualquier superficie. Usted simplemente coloca el dispositivo de emulación en el mismo ambiente donde se encuentra la superficie de interés. Al mismo tiempo que las moléculas de agua comienzan a condensarse sobre esta última, lo mismo está sucediendo sobre la superficie del dispositivo de emulación. Una vez conseguida la emulación, como comprobación, se aplica una pequeña corriente a través del rocío en sus etapas tempranas de formación. La señal de respuesta se amplifica y se procesa para propósitos de medición, control o diagnóstico.

Medición de humedad en sólidos

Actualmente se dispone también de varios métodos para medir el contenido de agua en sólidos y materiales en estado granular, fibroso, etc., incluyendo el uso de sensores resistivos y capacitivos convencionales. Otro procedimiento común, particularmente adecuado para procesos industriales donde se manipulan y procesan tiras continuas de material (papel, textiles, etc.), es el **método infrarrojo**. En esta técnica, **figura 9.11**, una fuente principal y una fuente de referencia exploran mediante luz IR la superficie del material cuya humedad se desea medir. Dependiendo del contenido de humedad, una parte de esta radiación es absorbida por el agua contenida en el producto, mientras que la otra lo atraviesa. Midiendo esta última se determina la humedad relativa. Ω

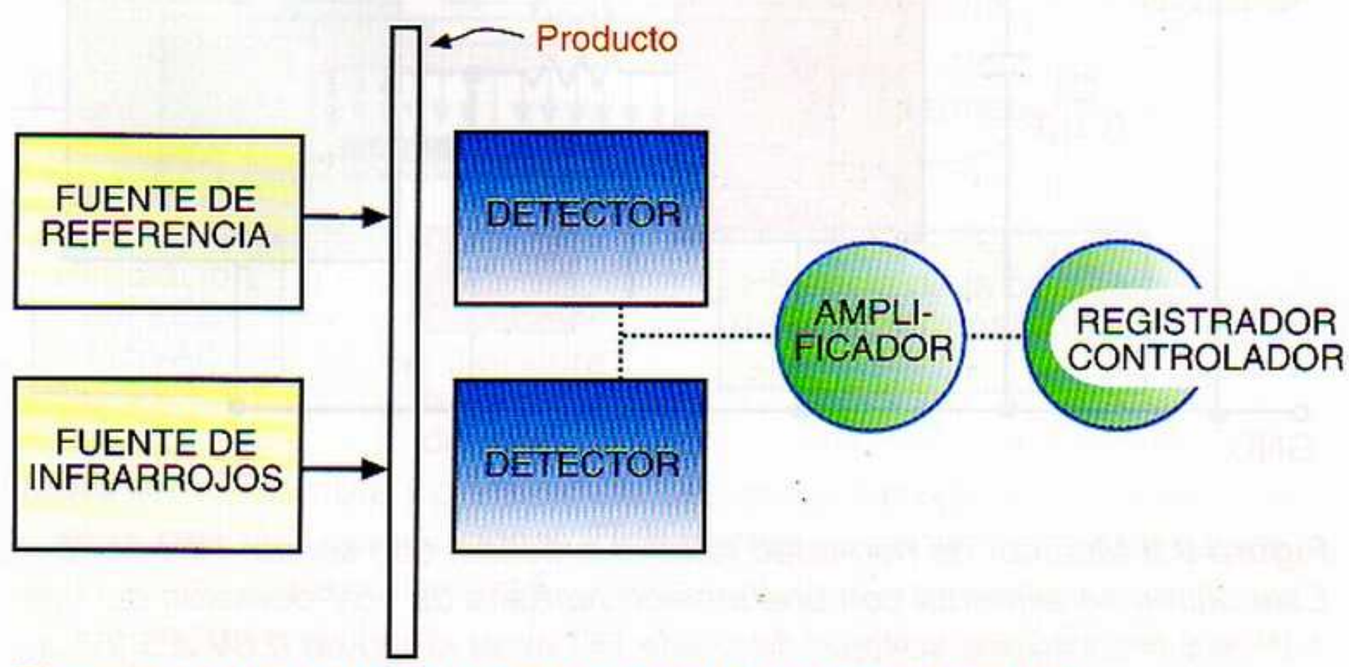


Figura 9.11 Medición de humedad en sólidos por infrarrojos

Capítulo 10

Sensores magnéticos

Los sensores magnéticos constituyen los órganos detectores de muchos sistemas de control industriales porque son muy sensibles, exactos, confiables y compactos; tienen una gran afinidad con los sistemas electrónicos y realizan mediciones a distancia, sin necesidad de contacto físico. En este capítulo examinaremos las características generales de algunos de ellos, con énfasis en los sensores que utilizan campos generados por imanes permanentes

Generalidades

Los **sensores magnéticos** detectan variaciones o perturbaciones en campos magnéticos. A partir de estos cambios, derivan información sobre propiedades físicas, por ejemplo la presencia o ausencia de un objeto, o la intensidad de una corriente eléctrica, **figura 10.1**. En este sentido, a diferencia de otros tipos de sensores, que miden directamente la propiedad física de interés, la salida de los sensores magnéticos siempre requiere alguna forma de procesamiento de señales adicional para traducirla al parámetro deseado.

La importancia de los sensores magnéticos se ha expandido considerablemente a medida que se han desarrollado diversas estrategias para detectar la presencia, intensidad o dirección de campos magnéticos, desde los producidos por la Tierra e imanes permanentes o suavemente magnetizados, hasta los asociados con corrientes eléctricas. Los mismos se usan, por ejemplo, como detectores de proximidad, medidores de velocidad y distancia, brújulas de navegación, sensores de corriente, etc. Todas estas propiedades se miden sin necesidad de contacto físico con el medio bajo observación, lo cual constituye uno de sus principales atractivos, **figura 10.2**.

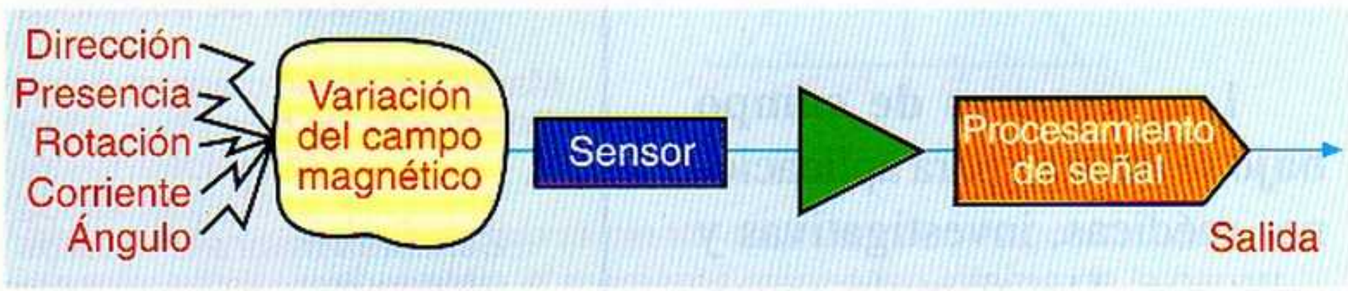


***Figura 10.1**. Los sensores magnéticos detectan cambios en campos magnéticos y a partir de ellos derivan información sobre propiedades físicas*

Figura 10.2 Sensor magnético utilizado en conjunción con un imán de anillo para medir la dirección, ángulo y velocidad de rotación de un eje

Tipos de sensores magnéticos

Los sensores magnéticos se catalogan principalmente de acuerdo a su principio de funcionamiento y el rango de intensidades de campo que cubren. Desde este último punto de vista, se habla de sensores de campo **bajo**, **medio** y **alto**. Los primeros detectan campos inferiores a un microgauss (1 μG), los segundos campos entre 1 μG y 10 G, y los terceros campos mayores a 10 G. La tabla de la **figura 10.3** relaciona las principales tecnologías de sensores magnéticos y sus rangos de detección típicos en gauss o teslas ($1G=10^{-4}T$).

Los **sensores de campo bajo** se utilizan para aplicaciones médicas, investigativas y militares. Un ejemplo representativo lo constituyen los dispositivos superconductores de interferencia cuántica o **SQUID**, desarrollados en 1962. Los mismos están basados en las propiedades de las llamadas ***uniones Josephson*** y son capaces de detectar campos magnéticos tan pequeños como los del cerebro humano, los cuales son del orden de unas pocas decenas de femtoteslas ($1fT=10^{-15}T$). En contraste, el campo magnético terrestre es del orden de 50μT (0.5G) y el de un imán permanente fuerte de unos pocos miles de gauss.

Otros ejemplos de sensores de campo bajo son los magnetómetros de bobina de búsqueda, de precesión nuclear, de bombeo óptico y de fibra óptica.

Los **magnetómetros de bobina de búsqueda**, en particular, están basados en la ley de la inducción de Faraday, la cual establece que en una bobina inmersa en un campo magnético variable se induce un voltaje proporcional a la rata de cambio del mismo. Son relativamente económicos y fáciles de fabricar, pero no pueden detectar campos estáticos o que cambian lentamente. Son muy utilizados, por ejemplo, en sistemas inteligentes de control de tráfico.

Los **sensores de campo medio** aprovechan las características, anomalías y cambios del campo magnético terrestre. Un ejemplo lo constituyen los **magnetómetros de compuerta de flujo** (*flux-gate*), desarrollados en 1928 y muy utilizados en sistemas de navegación basados en brújulas. Constan de dos bobinas, una primaria y una secundaria, devanadas alrededor de un núcleo ferromagnético de alta permeabilidad, **figura 10.4**. Al primario se aplica una onda cuadrada, digamos de 10kHz, y en el secundario se recibe como respuesta una señal que representa los cambios en la permeabilidad del núcleo causados por el campo magnético externo.

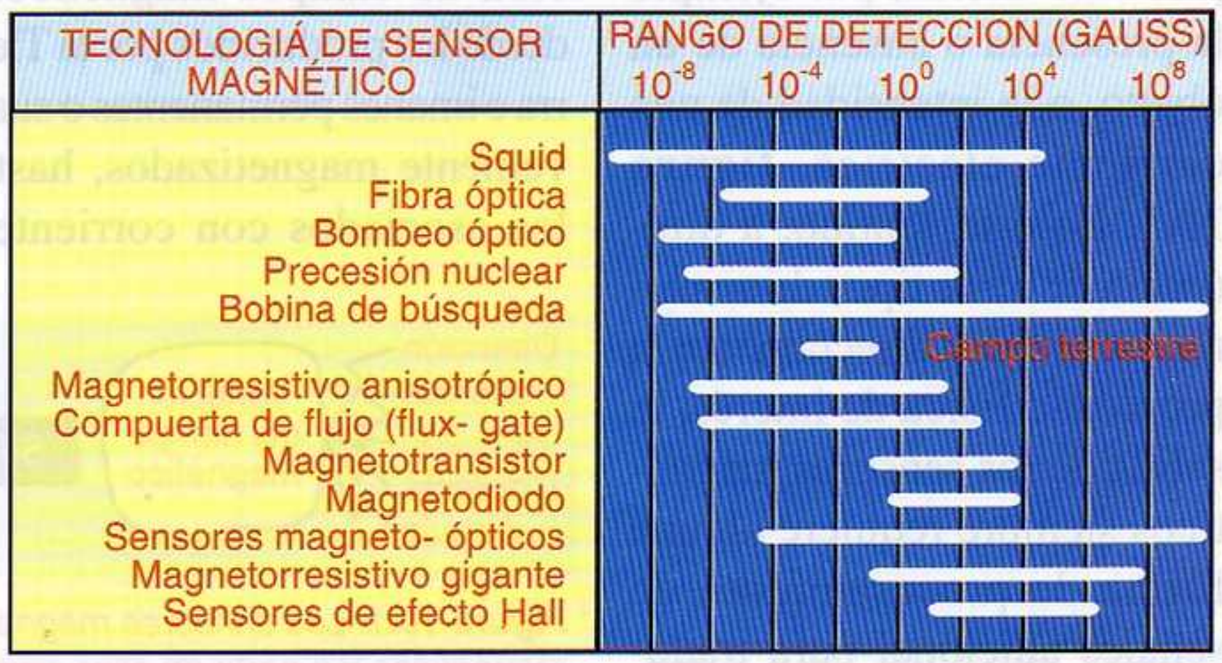


Figura 10.3 Tecnologías de sensores magnéticos y rangos de detección

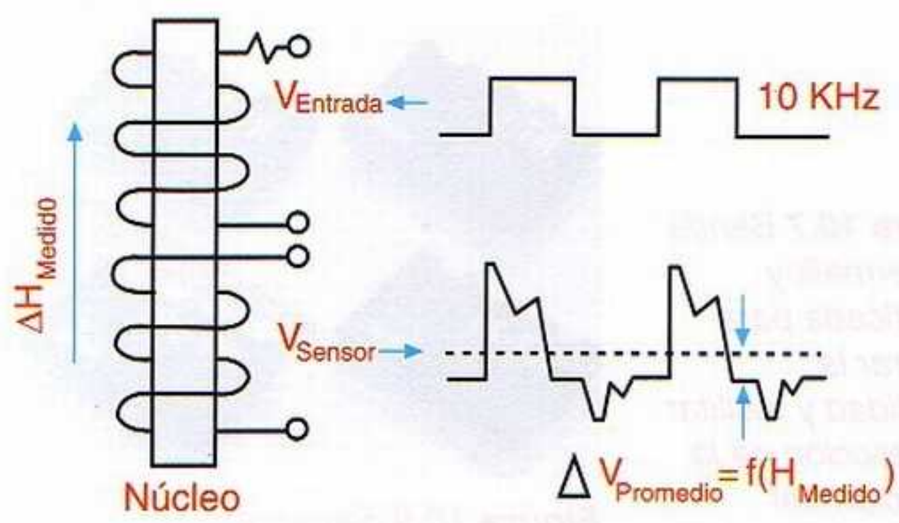


Figura 10.4 Principio de funcionamiento de un magnetómetro flux-gate

Otros ejemplos de sensores de campo medio son los sensores magnetoinductivos y los sensores magnetorresistivos.

Los **sensores magnetoinductivos**, desarrollados en 1989, constan simplemente de una bobina devanada alrededor de un núcleo ferromagnético cuya permeabilidad cambia dentro del campo magnético terrestre. Para determinar la magnitud del campo externo, la bobina se polariza mediante una corriente DC y se incorpora en un oscilador de relajación RL, **figura 10.5**. La frecuencia de este último es proporcional al campo aplicado. Este tipo de magnetómetros son económicos y tienen bajos requisitos de potencia.

Los **sensores magnetorresistivos** están basados en un fenómeno, descubierto en 1856 por William Thompson, conocido como efecto **AMR** o *magnetorresistivo anisotrópico* y que se presenta principalmente en aleaciones ferromagnéticas de hierro (Fe), níquel (Ni) y cromo (Cr), como el Permalloy (81%Ni, 19%Fe). Estos materiales poseen un **momento magnético** interno (Mo), es decir una orientación de magnetización preferida a lo largo de sus ejes, definida durante el proceso de fabricación y modificable mediante un campo magnético externo, **figura 10.6**. Cuando se aplica este último, la magnetización resultante (M) varía la resistividad, y por tanto la resistencia eléctrica del material.

Actualmente, los materiales ferromagnéticos se depositan como películas delgadas sobre pastillas de silicio y se estructuran en pequeñas bandas de 40nm de espesor, 10 mm de ancho y 100 mm de largo. La resistencia de la banda depende del ángulo (θ) entre la dirección de la magnetización total (M) y la de la corriente (I). Esta dependencia, que no es propiamente lineal, puede ser descrita por el cambio relativo en la resistividad (ΔR/R), de modo que cuando M e I son paralelos entre sí, la resistencia de la banda es muy alta, mientras que si son perpendiculares, la misma es muy pequeña. El valor máximo de ΔR/R es del orden del 2% al 5%.

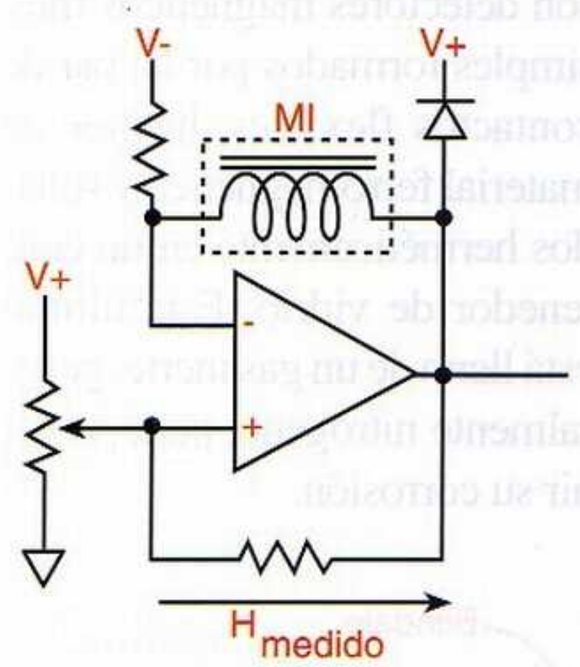


Figura 10.5 Circuito básico de utilización de un sensor magnetoinductivo. Este último (MI) es simplemente una bobina devanada en un núcleo ferromagnético que cambia de permeabilidad dentro del campo magnético terrestre

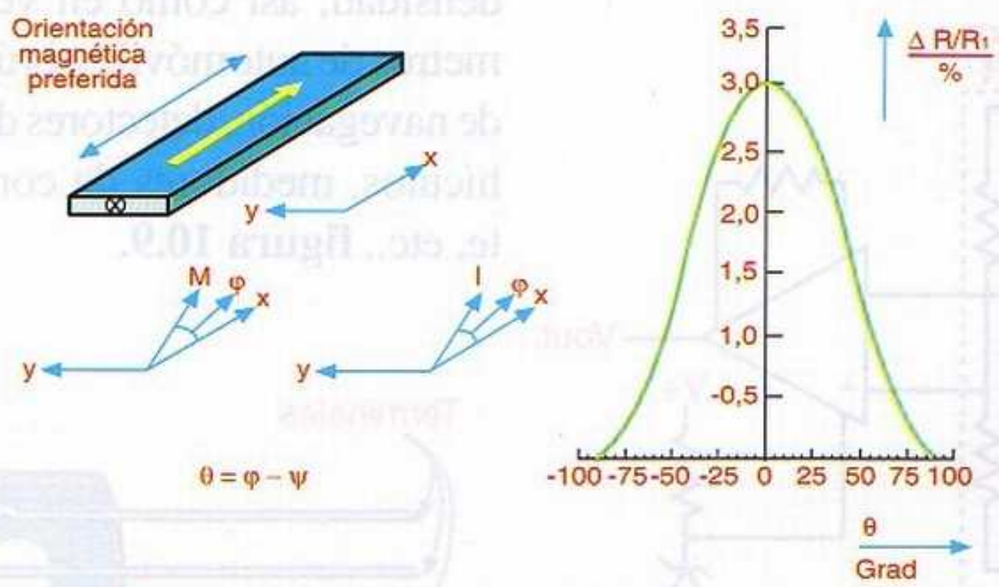


Figura 10.6 Principio de funcionamiento de un sensor magnetorresitivo. En este caso, Mo representa el momento magnético interno de la banda ferromagnética, I la corriente a través suyo, M la magnetización total resultante de la aplicación del campo magnético externo y θ=φ−ψ el ángulo entre M e I

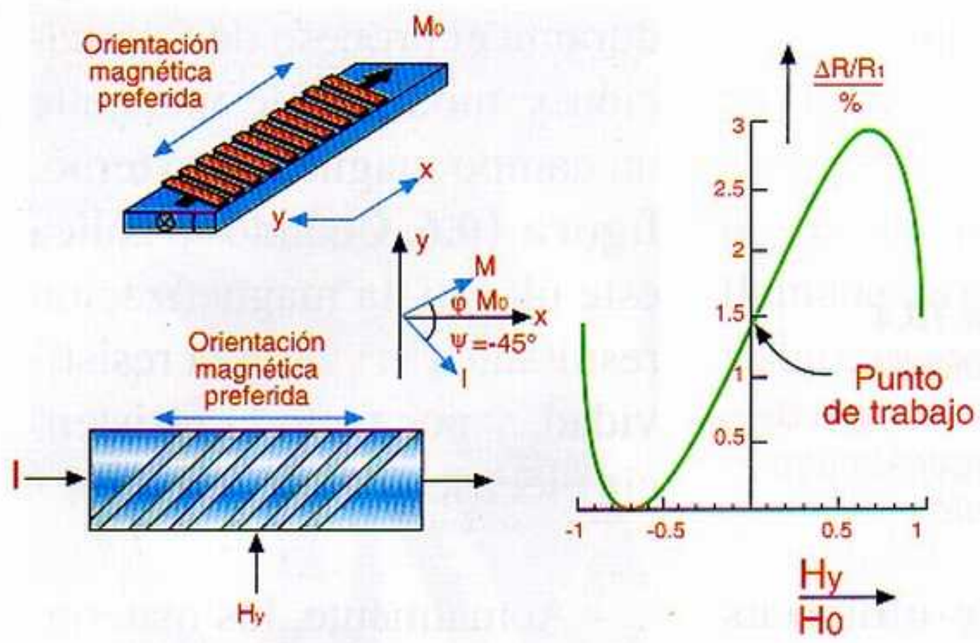


Figura 10.7 *Banda de Permalloy modificada para mejorar la linealidad y facilitar la detección de la dirección del campo magnético externo*

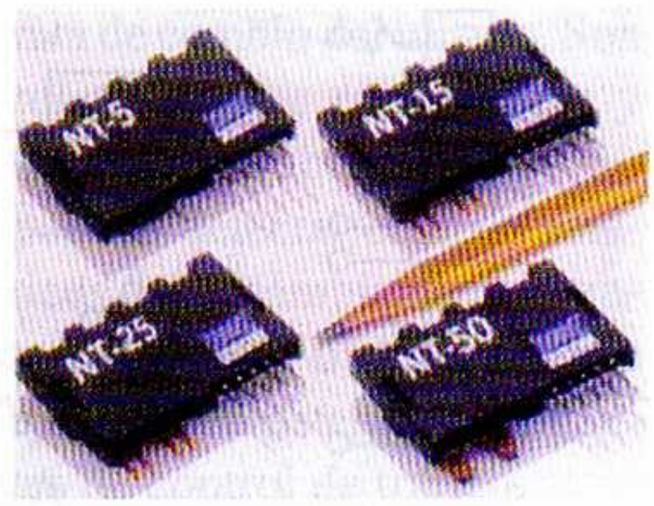


Figura 10.9 *Sensores de corriente magnetorresistivos anisotrópicos*

Para mejorar la linealidad y la sensibilidad alrededor del punto de trabajo, la banda ferromagnética, generalmente de Permalloy, se complementa con pequeñas estructuras hechas de aluminio, u otro material altamente conductivo, **figura 10.7**. Estos bloques (*barber poles*), son de unas pocas micras de espesor y están dispuestos a un ángulo menor de 45° con respecto al eje principal de la tira. Puesto que los mismos actúan como cortos locales del Permalloy, obligan a la corriente a fluir a través de ellos en esa dirección. De este modo, se facilita también la detección de la dirección del campo magnético externo.

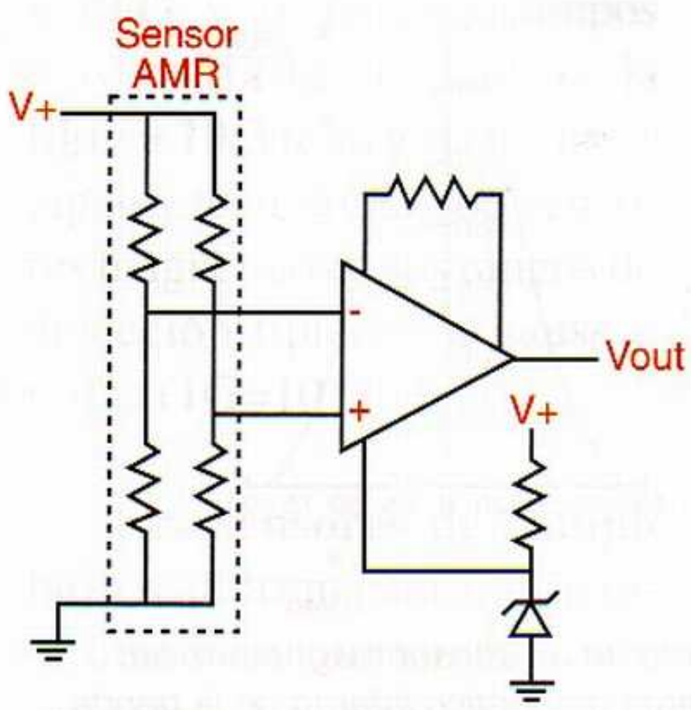


Figura 10.8 *Circuito básico de utilización de un sensor magnetorresistivo anisotrópico*

En la mayoría de los casos, los sensores magnetorresistivos están formados por cuatro elementos como los descritos, conectados en un puente de Wheatstone para permitir la medición, tanto de la magnitud como de la dirección del campo, a lo largo de un solo eje, **figura 10.8**. Los mismos ofrecen, entre otras ventajas, operación a altas frecuencias (>5MHz) y temperaturas (>150ºC), tamaño reducido, inmunidad al ruido y excelente sensibilidad. Esto último les permite detectar campos muy débiles, incluso de unos pocos nanoteslas (nT). Se utilizan en cabezas de lectura de *drives* de cintas y discos de alta densidad, así como en velocímetros de automóviles, brújulas de navegación, detectores de vehículos, medidores de corriente, etc., **figura 10.9.**

Los **sensores de campo alto** utilizan el campo magnético producido por imanes permanentes para magnetizar o polarizar objetos ferromagnéticos vecinos y detectar así cambios en su propio campo circundante. Son los más empleados a nivel industrial. En esta categoría se incluyen los *reedswitches*, las magnetorresistencias y los dispositivos de efectos Hall, Wiegand y GMR (magnetorresistivo gigante).

Interruptores *reed*

Los ***reed-switches***, **figura 10.10**, son detectores magnéticos muy simples formados por un par de contactos flexibles, hechos de material ferromagnético y sellados herméticamente en un contenedor de vidrio. Este último está lleno de un gas inerte, generalmente nitrógeno, para prevenir su corrosión.

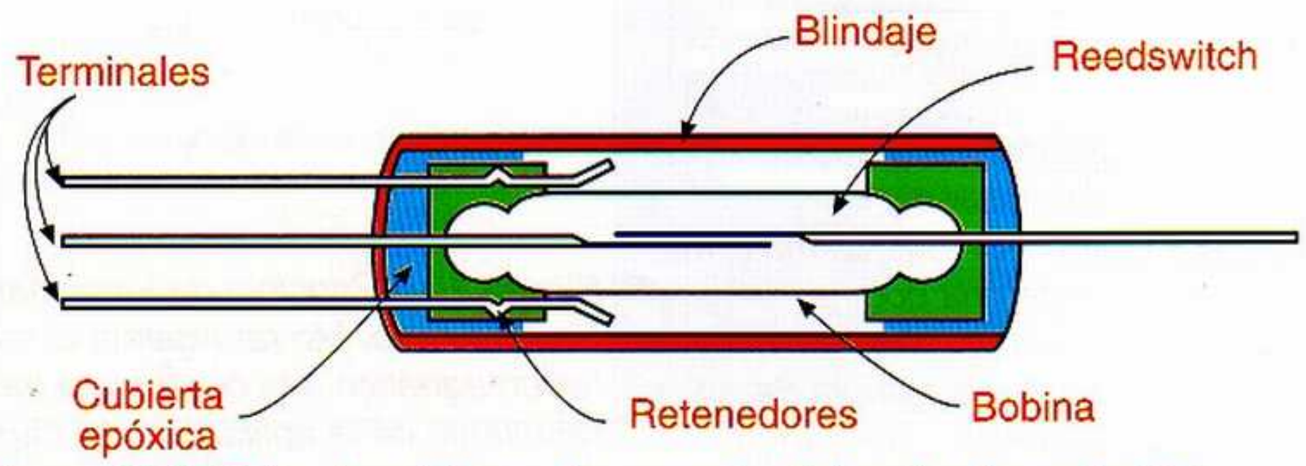


Figura 10.10 *Estructura interna de un reedswitch actuado por bobina*

Figura 10.11 Sensor de reedswitch que detecta objetos de acero o hierro sin necesidad de un imán externo

Los contactos o cañuelas (*reeds*) están normalmente abiertos o cerrados, pero cambian de estado en presencia de un campo magnético externo intenso, producido, por ejemplo, por un imán o una bobina con corriente. Al remover el imán o la corriente, los contactos retornan rápidamente a sus posiciones originales.

Los *reedswitches* no requieren mantenimiento y son altamente inmunes al polvo, la contaminación y las fluctuaciones pequeñas en el campo. Además, tienen una larga vida útil, del orden de 10^6 a 10^7 operaciones o accionamientos, debido a que utilizan contactos de rodio bañados en plata. Estos últimos, disponibles en configuraciones NO, NC y de doble tiro, pueden conmutar corrientes de 0.1- 0.2 A y voltajes de 100-200 V. También se dispone de *reedswitches* con cerrojo (*latching*), que responden a impulsos, y de *reedswitches* húmedos de mercurio, capaces de conmutar corrientes hasta de 1 A.

Los *reedswitches* son muy populares debido a su bajo costo, diseño simple, alta confiabilidad y bajo consumo de potencia. Además, son muy fáciles de usar. Por ejemplo, adicionando un pequeño imán permanente se obtiene un interruptor de proximidad muy simple que es frecuentemente usado en sistemas de seguridad para monitorear la apertura de puertas o ventanas.

En este caso, el imán, asegurado a la parte móvil, activa el *reedswitch* cuando se acerca a este último y lo desactiva cuando se aleja. Asimismo, incorporando la fuente de campo magnético dentro de la propia estructura del *reedswitch* pueden detectarse objetos de hierro o acero, **figura 10.11**.

Sensores de efecto Hall

El **efecto Hall**, descubierto por Edwin C. Hall en 1879, consiste en la producción de una caída de voltaje a través de un conductor o un semiconductor con corriente, bajo la influencia de un campo magnético externo. Para que esto suceda, se requiere que la dirección del campo magnético sea perpendicular a la dirección de flujo de la corriente. Esta situación se ilustra en la **figura 10.12**, asumiendo la utilización de una tira plana de cobre que lleva una corriente "i" en la dirección indicada por la flecha. En (a) se supone que los portadores de carga son positivos (huecos, dirección convencional) y en (b) que son negativos (electrones libres, dirección real).

La explicación de lo que sucede en el ejemplo anterior es simple: el campo magnético transversal ejerce una fuerza desviadora **F** (llamada **fuerza de Lorentz**) sobre la tira. Esta fuerza, a su vez, causa la deflexión de los portadores de carga que se mueven a través del material. Como resultado, aparece una diferencia de potencial **Vxy** (llamada **voltaje Hall**) entre los extremos del conductor. Este voltaje es proporcional a la intensidad del campo magnético aplicado y su polaridad depende del signo de los portadores de carga.

El **efecto Hall** se presenta tanto en conductores como en semiconductores. Sin embargo, las diferencias de potencial producidas en tiras metálicas son muy pequeñas, siendo a menudo enmascaradas por el ruido. Por esta ra-

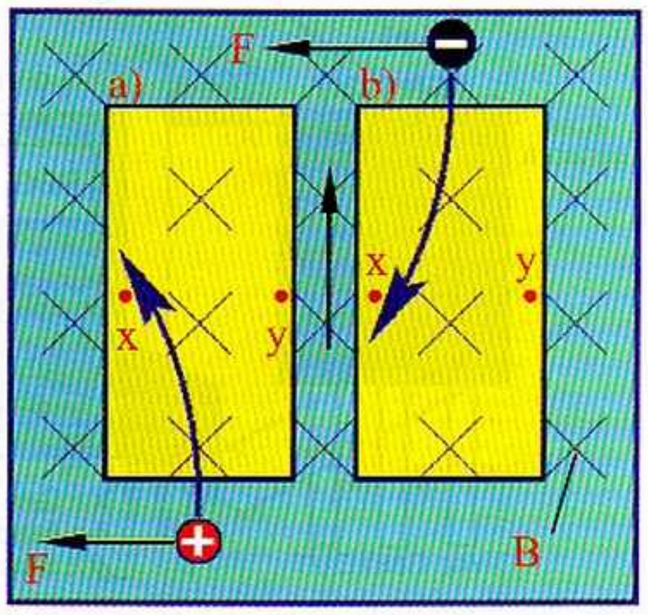


Figura 10.12. Principio de funcionamiento de los dispositivos de efecto Hall

zón, los dispositivos comerciales utilizan materiales semiconductores especiales, donde el efecto Hall es más notable. En estos casos, el elemento sensor básico es generalmente una tira de arseniuro de galio (GaAs) o de indio (InAs) la cual, cuando se polariza mediante una corriente constante y se sumerge en un campo magnético transversal a su superficie, genera un voltaje proporcional a la intensidad del campo. Este voltaje se refuerza mediante un amplificador operacional incorporado en el producto y se procesa para proporcionar una señal de salida útil.

En algunos dispositivos, el voltaje Hall amplificado se proporciona directamente en uno de los pines de salida del componente. Este es el caso de los **transductores de efecto Hall lineales**. En otros, dicho voltaje se compara con un voltaje de referencia interno para proporcionar una señal de salida digital. Este es el caso de los **interruptores de efecto Hall**, como el circuito integrado **UGN-3020T** de Sprague, **figura 10.13**, el cual contiene, en una misma cápsula de 3 pines un sensor de efecto Hall, un amplificador, *un schmitt trigger*, un transistor de salida NPN de colector abierto y un regulador de voltaje.

En condiciones normales, cuando la magnitud del campo magnético externo aplicado perpendicularmente a la superficie sensible del *chip* es inferior a un valor umbral de activación (llamado **punto de operación**), el transistor de salida está cortado (***off***) y no circula corriente de colector, excepto una corriente de fuga muy débil (0.1μA, valor típico). Cuando la magnitud del campo magnético excede el valor umbral (220 G, valor típico), el transistor de salida pasa al estado de conducción (***on***), permitiendo la circulación de una corriente de colector importante (25mA, máximo).

La situación anterior (transistor de salida ***on***) se mantiene hasta que la magnitud del campo magnético transversal caiga por debajo de un valor umbral de desactivación (llamado **punto de liberación**), el cual es inferior al punto de operación (165 G, valor típico).

Esta característica de histéresis, representada gráficamente en la **figura 10.13c** y manejada por el Schmitt-Trigger, evita que el circuito oscile cuando el amplificador esté cerca del umbral de activación o se dispare erráticamente por campos provenientes de otros dispositivos eléctricos en las vecindades. El regulador de voltaje interno permite que el *chip* pueda ser operado con un amplio rango de voltajes, desde 4.5V hasta 24V. El consumo de corriente es muy bajo, típicamente 12mA@12V.

Los dispositivos de efecto Hall encuentran actualmente aplicación en una gran va-

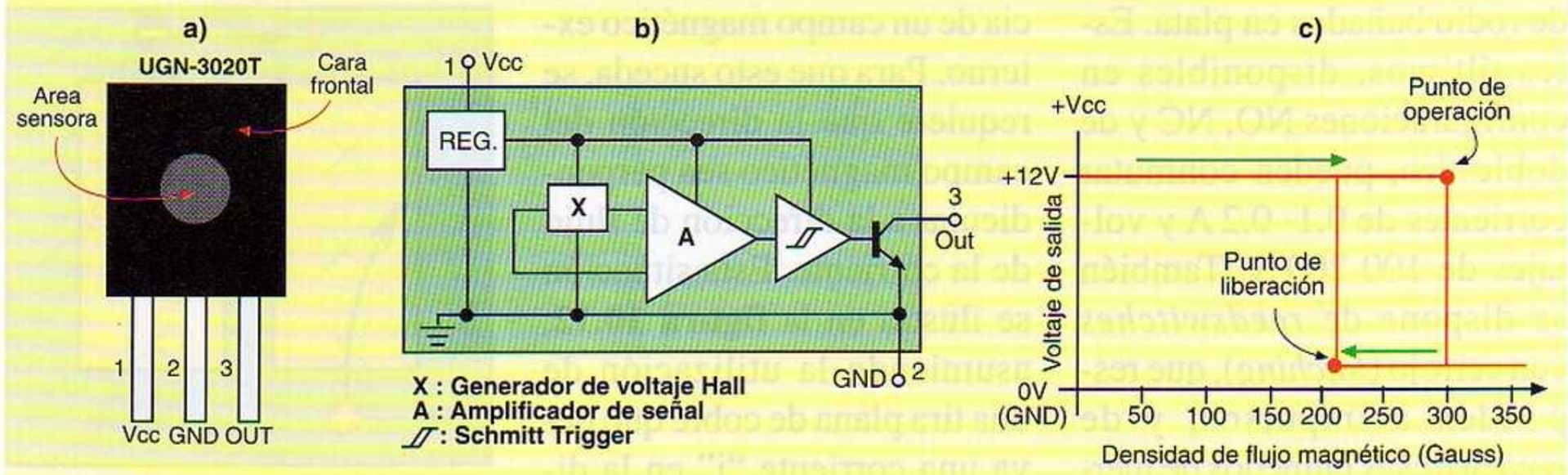


Figura 10.13 Interruptor de efecto Hall UGN-3020. a) aspecto físico. b) Estructura interna. c) curva de histéresis

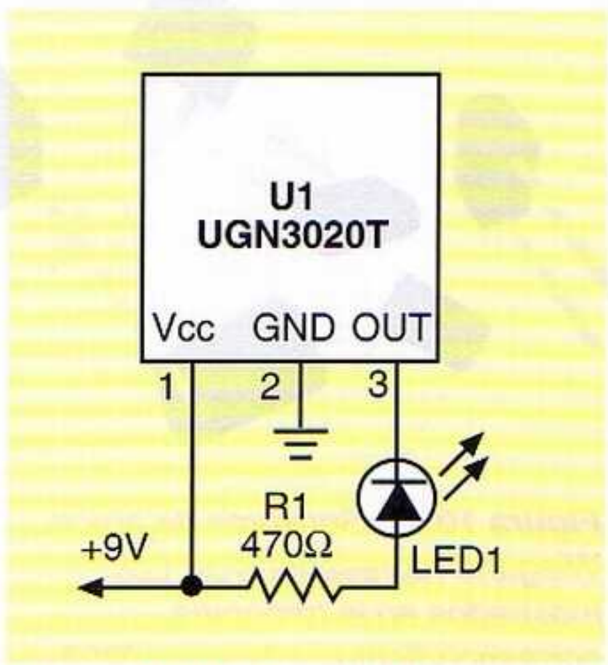


Figura 10.14. Circuito básico de aplicación de un interruptor de efecto Hall

riedad de situaciones prácticas donde se requiere detectar o medir posición, movimiento o campos magnéticos sin necesidad de contacto físico. Los mismos ofrecen, entre otras, la siguientes ventajas:

- Operación libre de rebote.
- Son confiables, robustos y tienen una larga vida útil.
- Son compatibles con microprocesadores, microcontroladores y todo tipo de circuitos y sistemas digitales.
- Son muy rápidos, operando por encima de 100kHz en la mayoría de casos.

En el campo de la electrónica automotriz, por ejemplo, los sensores de efecto Hall se utilizan en sistemas de frenado antibloqueo o ABS (*Anti-lock Brake System*), controles electrónicos de transmisión, sistemas de ignición, sistemas de navegación, etc. También se les encuentra en teclados, sistemas de seguridad, tacómetros, contadores, amperímetros, brújulas, máquinas de coser, guitarras eléctricas, etc. Otras aplicaciones incluyen:

- Control de velocidad de motores.
- Detección de la posición de válvulas, pistones, levas, palancas, ejes, etc.
- Medición de desplazamientos.
- Medición de campos magnéticos debidos a líneas eléctricas, transformadores y motores.
- Detección de la posición de ascensores.

Como ejemplo, en la **figura 10.14** se muestra un circuito sencillo de aplicación que puede ser utilizado para experimentar con el **UGN-3020T** y otros interruptores de efecto Hall similares, como el **HE-6450** de **Cherry**. Conectado de esta forma, sin ningún campo magnético externo presente, el transistor de salida está *off* y no circula corriente de colector. Por tanto, el LED no se ilumina. Para activar el circuito, coloque un imán permanente en las proximidades del *chip* como se indica en la **figura 10.15**, con el polo sur a una distancia conveniente, digamos 10 mm, de la superficie sensible (marcada con un círculo en la cara frontal).

Hecho lo anterior, mueva entonces el imán de frente, conservando la perpendicularidad, hasta que el LED se ilumine. Esto ocurrirá, por ejemplo, a 5 mm de la superficie sensible. Ahora aleje del imán hasta que el LED se apague. Como resultado de la histéresis incorporada en el interruptor, esto ocurrirá, digamos, a 7 mm de la superficie sensible.

Los valores reales de las distancias de activación y desactivación dependerán de las características del imán. Entre más intenso sea el campo magnético producido por este último, será posible activar el interruptor a una mayor distancia, y viceversa. En muchos casos, para que la conmutación sea efectiva, se requiere también que, además de la intensidad, cambie también la polaridad del campo magnético aplicado.

Sensores de efecto Wiegand

El **efecto Wiegand,** basado en un proceso de fabricación pa-

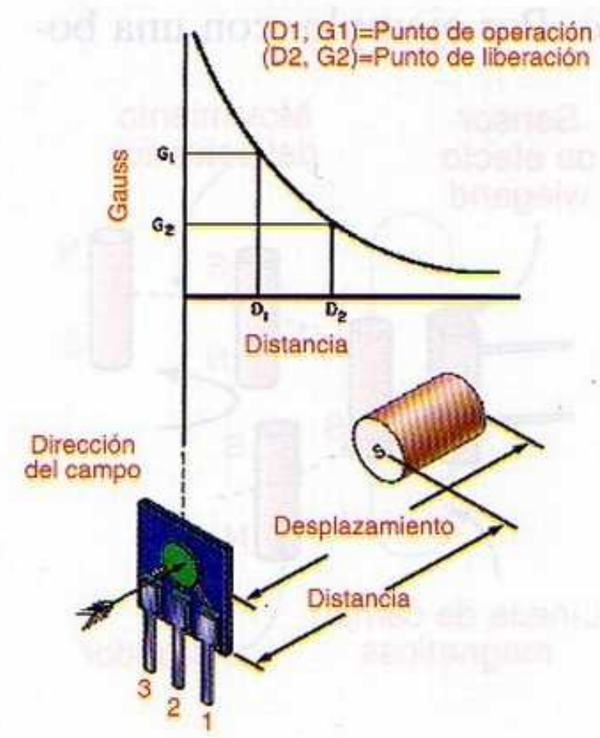


Figura 10.15. Forma de orientar un imán permanente con respecto a un interruptor de efecto Hall

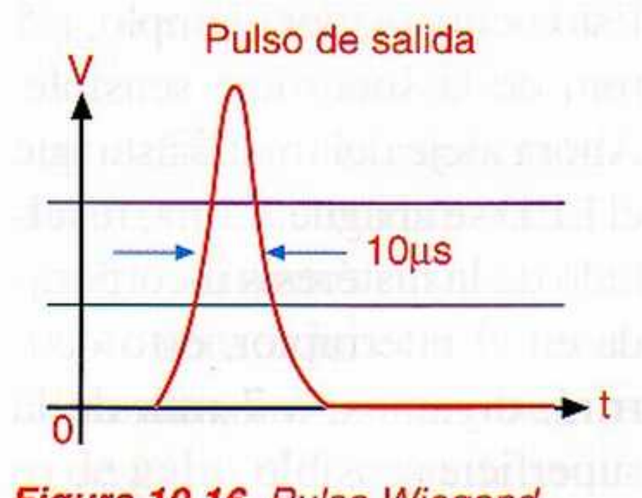


Figura 10.16. Pulso Wiegand típico. La amplitud depende de la longitud del alambre Wiegand y del número de espiras de la bobina. El ancho es prácticamente constante

tentado por **John R. Wiegand** en 1981, consiste en la conmutación o inversión de la magnetización de la zona central de un hilo ferromagnético de construcción especial, llamado **alambre Wiegand**, cuando se le somete a campos magnéticos de polaridad alternada. Si alrededor de este alambre o en sus vecindades se coloca una bobina, en la misma se induce un pulso de voltaje, **figura 10.16**, llamado **pulso Wiegand**, cuya amplitud y duración son independientes de la velocidad de variación del campo magnético aplicado. Por ejemplo, con una bobina de 1 000 vueltas, la amplitud y la duración del pulso inducido son del orden de 3V y 20ms, respectivamente.

Los sensores basados en el efecto Wiegand, **figura 10.17**, son relativamente simples desde el punto de vista constructivo, puesto que sólo requieren de un alambre Wiegand de corta longitud y una bobina sensora para producir pulsos de salida útiles en respuesta a los cambios en el campo magnético externo aplicado. Este último puede ser producido, por ejemplo, mediante un juego de imanes permanentes pequeños, o utilizando un electroimán AC devanado alrededor del cuerpo del sensor, como se indica en las **figuras 10.18 y 10.19,** respectivamente.

El alambre Wiegand propiamente dicho se fabrica con **Vicalloy**, una aleación ferromagnética de cobalto, hierro y vanadio ($Co_{52}Fe_{38}V_{10}$), utilizando un proceso de labrado en frío. Mediante esta técnica, el alambre se tuerce y destuerce progresivamente mientras es sometido a una tensión mecánica. Una vez deformado, es recocido a una temperatura hasta de 400°C para mantenerlo tensionado. De este modo, el núcleo o zona central del hilo adquiere un magnetismo *suave*, es decir con un ciclo de histéresis pequeño, y la cubierta o parte exterior un magnetismo *duro*, lo que implica un ciclo de histéresis grande.

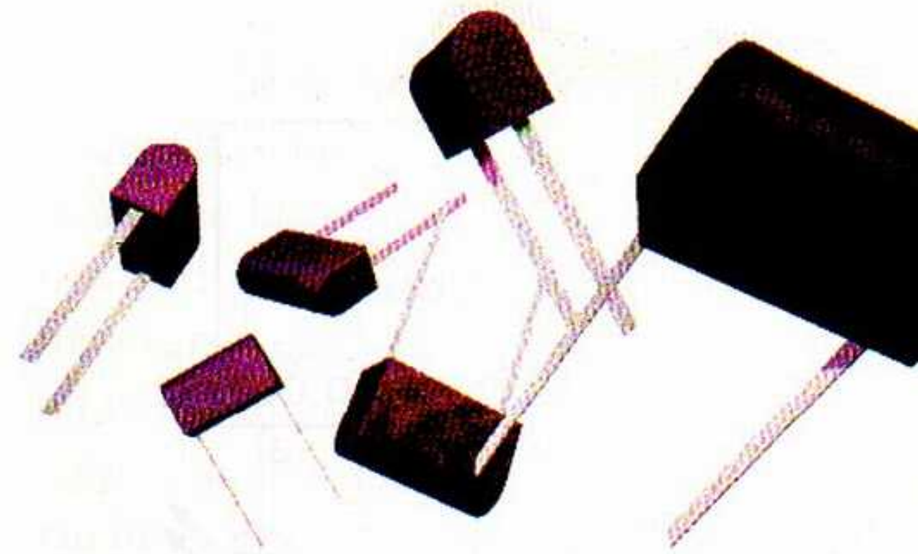


Figura 10.17. Sensores de efecto Wiegand representativos. Los mostrados en la fotografía, correspondientes a la serie 2000 de HID Corporation (www.hidcorp.com), se montan en tarjetas de circuito impreso y producen típicamente pulsos de 10 ms de ancho y más de 2.75 V de amplitud. La intensidad de campo recomendada es del orden de 85 G

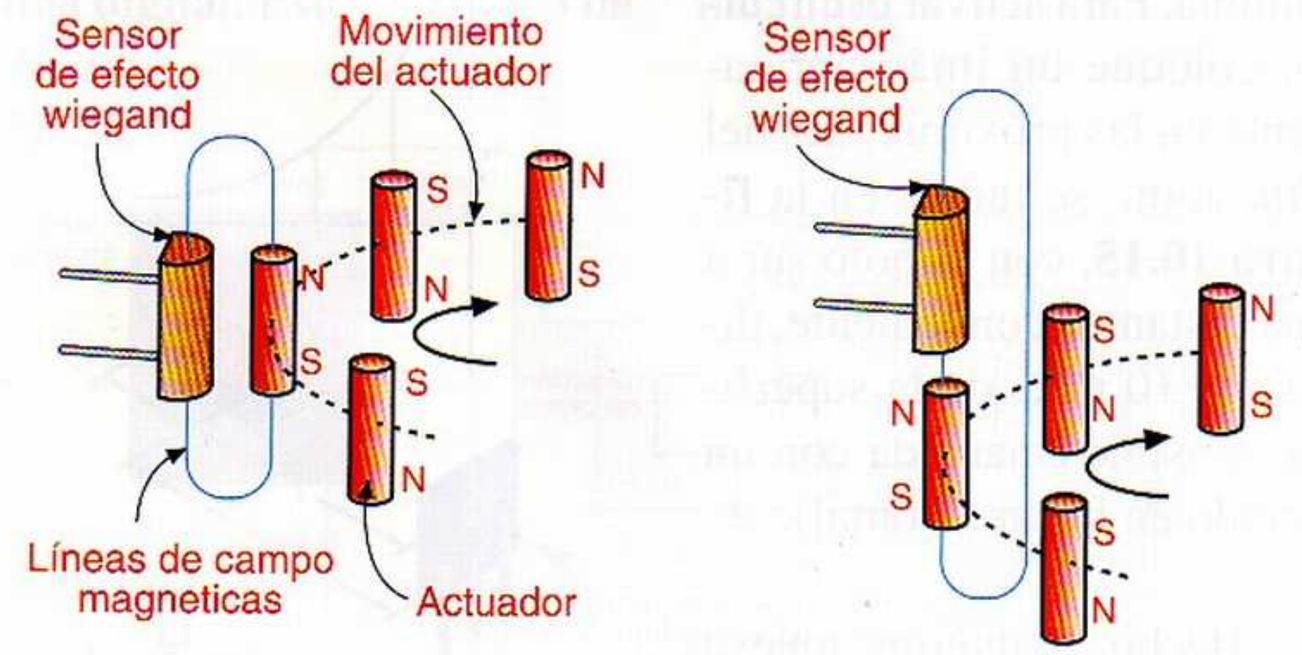


Figura 10.18. Formas de excitar un sensor de efecto Wiegand mediante imanes permanentes. El método de la derecha proporciona un acoplamiento óptimo entre el sensor y el actuador.

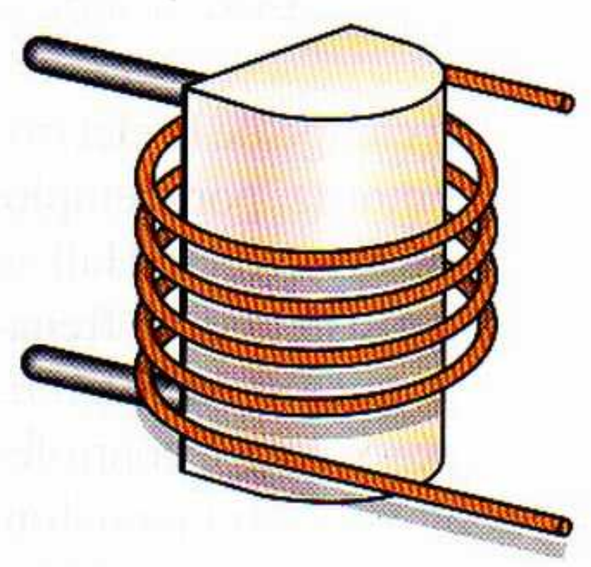


Figura 10.19. Forma de utilizar una bobina externa para producir el campo magnético de excitación de un sensor de efecto Wiegand. La bobina debe ser alimentada con AC

En condiciones normales, la cubierta y el núcleo están inicialmente saturados y magnetizados en direcciones opuestas. Las líneas de flujo de la cubierta circulan por el núcleo y lo mantienen magnetizado. Al aplicar al alambre un campo magnético alterno longitudinal, paralelo a la cubierta, el campo del núcleo experimentará una serie de conmutaciones magnéticas, es decir de inversiones de polaridad, como resultado de la reorientación de sus dominios magnéticos. Estos cambios bruscos del flujo magnético, llamados **saltos de Barkhausen**, son los que inducen en la bobina los pulsos de voltaje característicos de los sensores de efecto Wiegand. El proceso se ilustra en la **figura 10.20**.

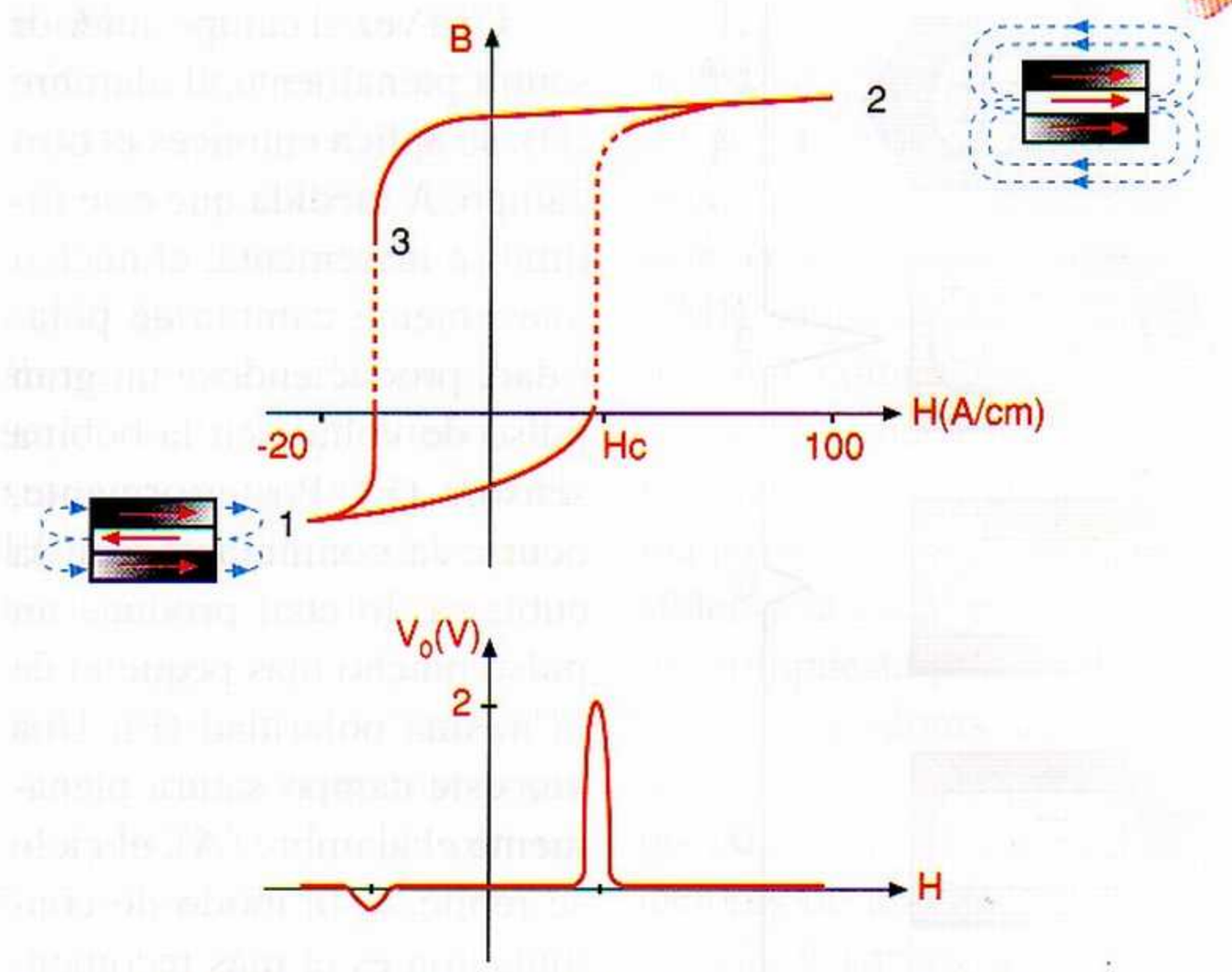


Figura 10.20. Conmutación magnética de los campos del núcleo y la cubierta de un alambre Wiegand

En este caso, la excitación del efecto Wiegand se realiza utilizando dos valores de campo externo H diferentes (+100 A/cm y -20 A/cm), que se aplican alternativamente. Se dice, entonces, que el dispositivo trabaja por conmutación **asimétrica**. Inicialmente (punto 1), los campos del núcleo y la cubierta están magnetizados en direcciones opuestas. Al aplicar el campo de +100 A/cm, la inducción magnética B del núcleo comienza a disminuir negativamente hasta que se anula y cambia bruscamente de polaridad, punto Hc. En este instante, en la bobina se induce un pulso de voltaje de gran amplitud. A partir de entonces, el núcleo y la cubierta quedan magnetizados en la misma dirección hasta saturarse, punto 2.

Para poder experimentar una nueva conmutación, debe retornarse el alambre a su estado magnético inicial. Para ello, se aplica el campo de -20A/cm, el cual causa que la inducción magnética B del núcleo comience a disminuir positivamente hasta anularse y cambiar de polaridad, punto 3. Cuando esto sucede, se induce un nuevo pulso de voltaje en la bobina, pero de menor amplitud que el pulso Wiegand y de polaridad opuesta. A partir de entonces, el núcleo y la cubierta quedan magnetizados en direcciones opuestas hasta saturarse, punto 1. El ciclo se repite.

También es posible excitar un alambre Wiegand por conmutación **simétrica**, es decir utilizando dos valores de campo de la misma magnitud, pero de polaridad opuesta, aplicados alternativamente. En este caso, se obtienen dos impulsos de tensión grandes y dos pequeños, como se ilustra en la **figura 10.21**.

Inicialmente, uno de los campos orienta las polaridades del núcleo y la cubierta en la misma dirección (A). A continuación se aplica el otro campo. A medida que este último se incrementa, el núcleo cambia de polaridad (B), y produce un gran pulso de voltaje. Posteriormente, la cubierta también cambia de polaridad (C), produciendo un pulso mucho más pequeño.

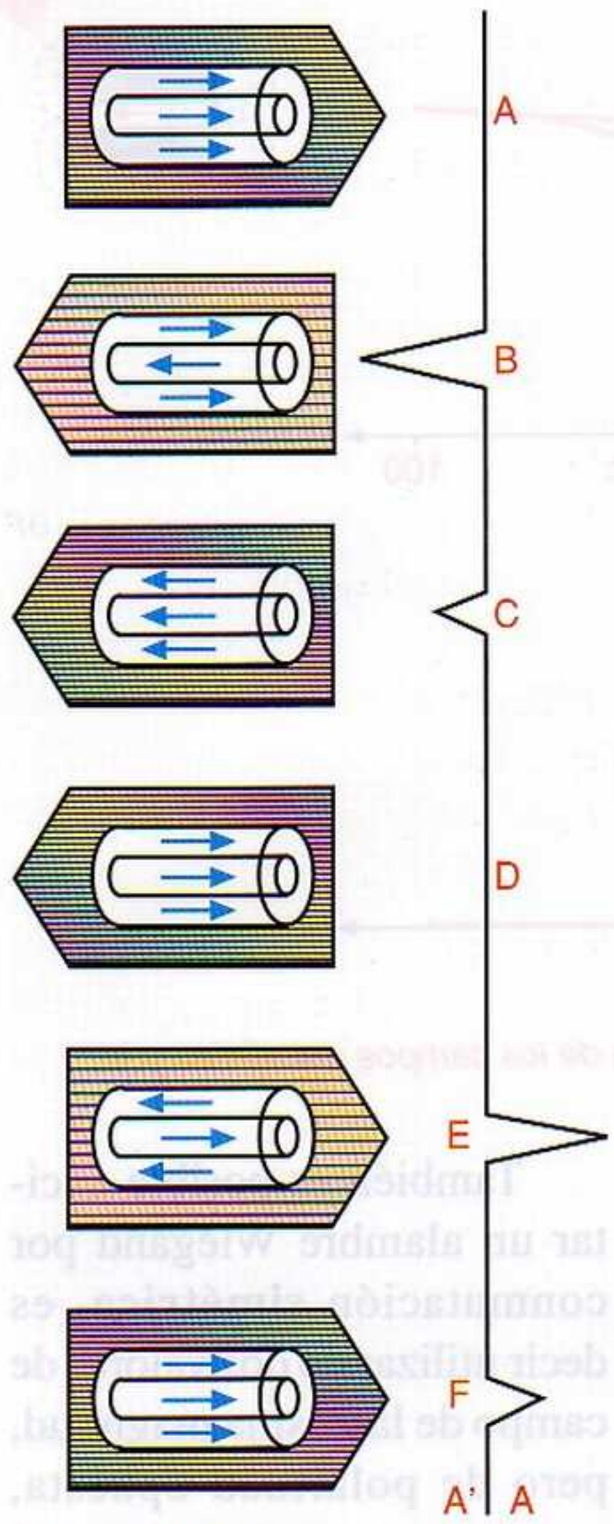


Figura 10.21 La conmutación simétrica de un alambre Wiegand ocurre cuando se utilizan campos magnéticos positivos y negativos alternos de igual intensidad para magnetizar y disparar el alambre

Una vez el campo anterior satura plenamente el alambre (D), se aplica entonces el otro campo. A medida que este último se incrementa, el núcleo nuevamente cambia de polaridad, produciéndose un gran pulso de voltaje en la bobina sensora (E). Posteriormente, ocurre la conmutación de la cubierta, lo cual produce un pulso mucho más pequeño de la misma polaridad (F). Una vez este campo satura plenamente el alambre (A), el ciclo se repite. Este modo de conmutación es el más recomendado, debido a que es muy fácil de producir con imanes permanentes.

Los sensores de efecto Wiegand ofrecen varias ventajas importantes que los hacen particularmente atractivos para aplicaciones industriales, automotrices, informáticas, de seguridad, etc. Por ejemplo: no necesitan de una fuente de alimentación, sólo requieren dos hilos de conexión, trabajan confiablemente en ambientes hostiles, tienen una larga vida útil, pueden generar pulsos a muy altas velocidades, su salida es compatible con lógica TTL y CMOS, tienen un amplio rango de temperaturas de operación, etc. Sus principales aplicaciones incluyen:

- Detección de la posición del cigüeñal y otras aplicaciones automotrices.
- Realización de teclados sin rebotes.
- Tacómetros y otros sistemas de medición de velocidades de rotación pequeñas.
- Indexado electrónico en medidores de agua, gas y electricidad.
- Sistemas antirrobo y tarjetas de identificación.
- Medición del flujo de fluidos.

Una aplicación muy corriente es la generación de pulsos en situaciones de conteo rotacional. En este caso, el sensor está formado por un alambre Wiegand de corta longitud, situado dentro de una bobina de captación y activado por los polos alternados de un imán permanente, **figura 10.22**. La separación *(gap)* de aire entre el sensor y el imán puede ser hasta de 1" (25.4 mm). El pulso de voltaje producido puede ser positivo o negativo dependiendo del polo magnético (norte o sur) que dispara el sensor. Su amplitud es del orden de 5 a 6V

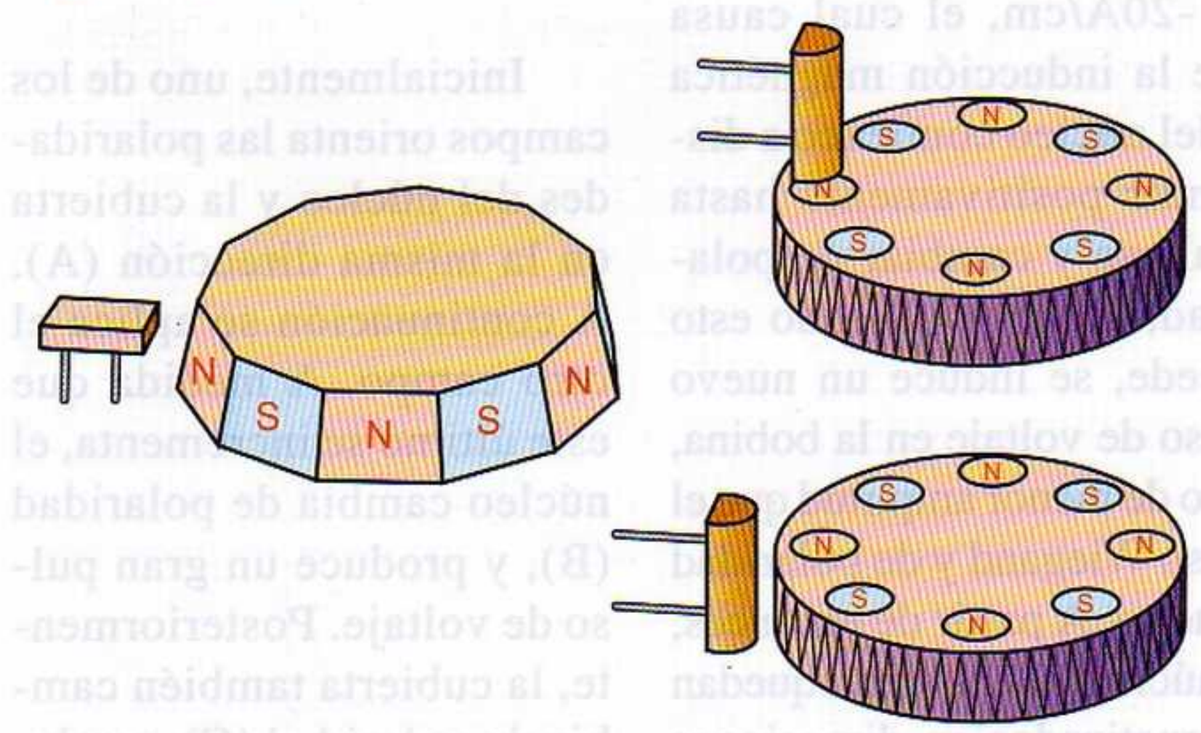


Figura 10.22. Tres formas de usar imanes permanentes para activar un sensor de efecto Wiegand

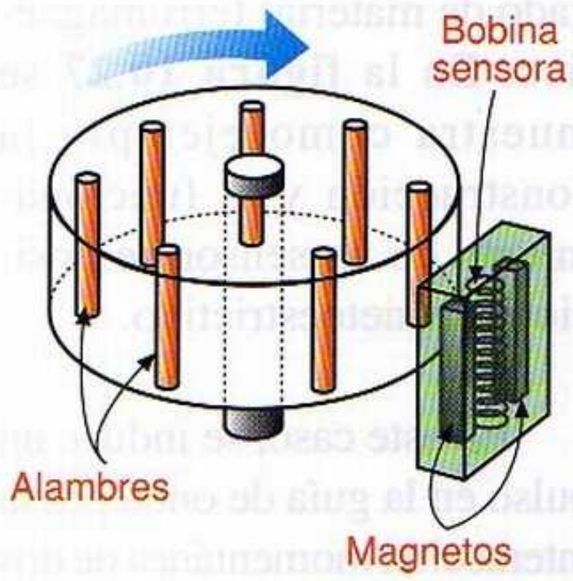


Figura 10.23 Un sensor rotatorio puede ser hecho usando una cabeza de lectura magnética estacionaria y embebiendo los alambres Wiegand en un tambor. Los alambres rotan a través del campo magnético fijo.

Otra forma de realizar un pulsador rotatorio es utilizando una cabeza de lectura magnética estacionaria y embebiendo los alambres Wiegand en un tambor. De este modo, los alambres rotan a través del campo magnético fijo, **figura 10.23**. Estos sensores proporcionan un pulso de voltaje del orden de 2V. Su principal ventaja radica en la habilidad para indicar la dirección de rotación, puesto que en un caso todos los pulsos son positivos, mientras que en el otro todos son negativos.

Sensores magnetorresistivos gigantes (GMR)

Los sensores GMR, **figura 10.24**, son estructuras formadas por dos capas de material ferromagnético, separadas por una capa de material conductor, cuya resistencia depende de la orientación de sus momentos magnéticos. Si estos últimos son paralelos, **figura 10.24a**, habrá menos dispersión de flujo en las regiones de interfaze y, por tanto, la resistencia será baja; mientras que si son antiparalelos, **figura 10.24b**, habrá más dispersión y, por tanto, la resistencia será alta. Este fenómeno, observado por primera vez en Francia en 1988, produce cambios de resistencia hasta del 70%, muy superiores a los obtenibles con el efecto AMR o magnetorresitivo anisotrópico convencional. De ahí su denominación de "gigante".

Los sensores GMR se fabrican por técnicas de deposición de película delgada. Las capas ferromagnéticas son de hierro, níquel o cobalto, y tienen un espesor del orden de 4 a 6 nm. La capa conductora, por su parte, es generalmente de cobre y su espesor es del orden de 3 a 5 nm (30 a 50 A). Para su uso en sensores, el material del emparedado usualmente se modela en la forma de bandas estrechas.

Para rotar las capas magnéticas en alineamiento antiparalelo o de alta resistencia, es suficiente con el campo producido por una corriente de unos pocos miliamperios por micra de ancho de cada banda. Para superar este campo y rotar los momentos magnéticos de ambas capas se requiere un campo externo del orden de 3-4 kA/m aplicado a lo largo de la longitud de la banda.

Los elementos magnetorresistivos gigantes se configuran generalmente formando un puente de Wheatstone, aunque también se fabrican resistencias GMR sencillas. Actualmente son muy comunes los senores GMR integrados inteligentes, los cuales incorporan en la misma pastilla los elementos sensibles y la electrónica asociada, compuesta principalmente de amplificadores, acondicionadores de señales, reguladores de voltaje o corriente, detectores de umbral, funciones lógicas y varias opciones de salida, **figura 10.25**.

Los sensores GMR se utilizan principalmente para la detección de proximidad, la medición de desplazamientos o cambios de posición, la detección de referencias rotacionales, la medición de corriente, etc. En la **figura 10.26**, por ejemplo, se muestra la forma de orientar un

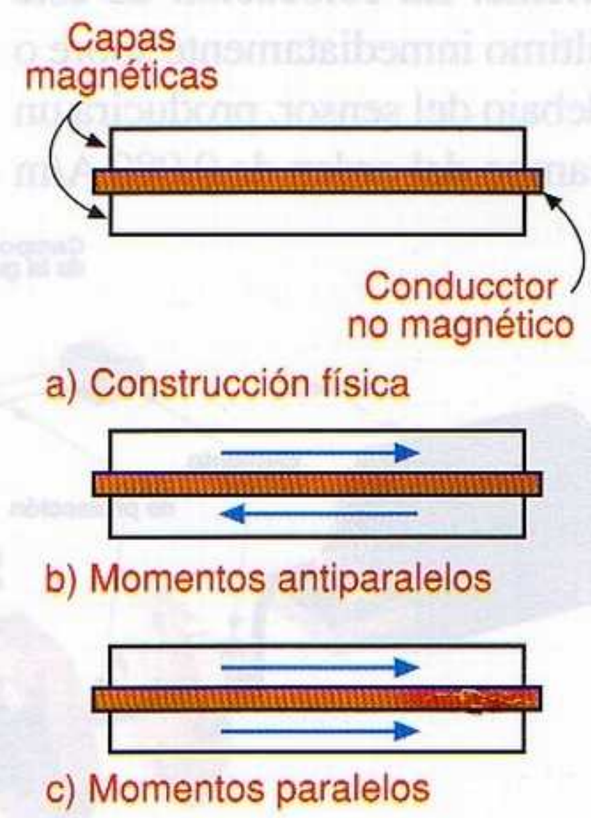


Figura 10.24 Principio de funcionamiento de los sensores magnetorresistivos gigantes (GMR)

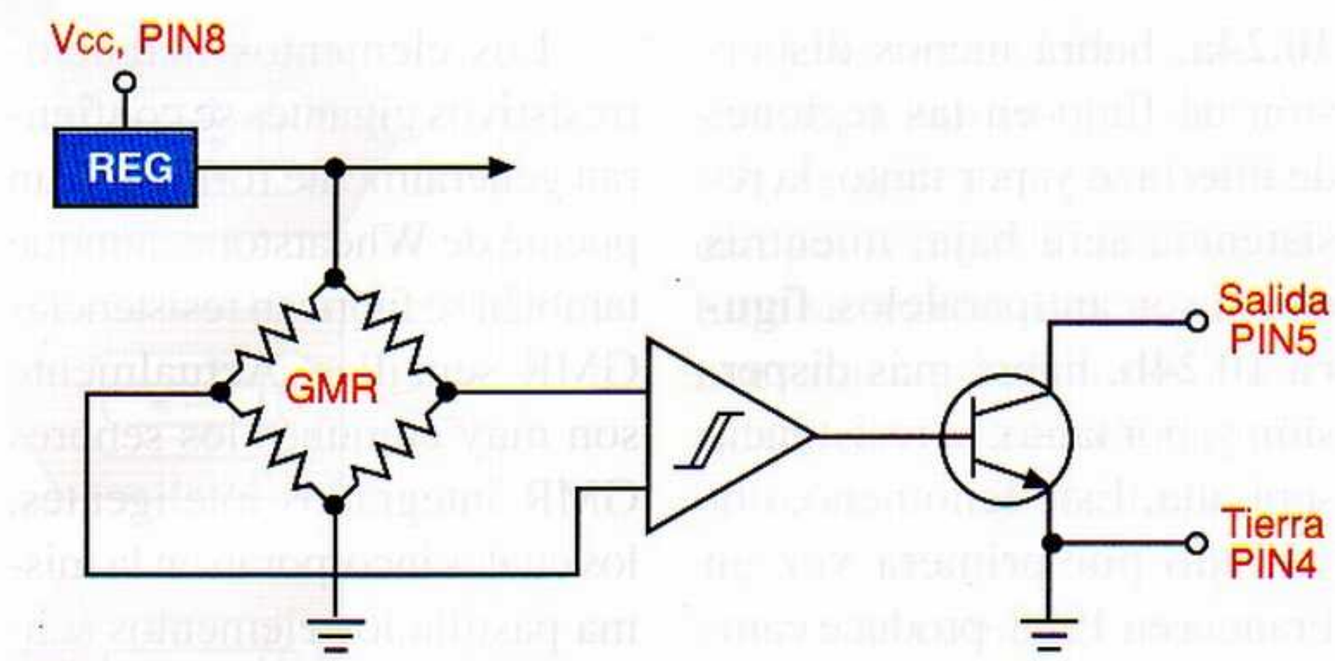


Figura 10.25 Estructura interna típica de un sensor GMR integrado representativo

Figura 10.26 Sensor GMR de puente utilizado para detectar el campo magnético creado por un alambre con corriente

sensor GMR tipo puente para detectar el campo magnético creado por un alambre con corriente. La colocación de este último inmediatamente sobre o debajo del sensor, producirá un campo del orden de 0.080 A/m por cada miliamperio de corriente. El sensor puede también ser montado inmediatamente sobre trazos de circuito impreso con corriente.

Sensores magnetoelásticos o magnetoestrictivos

La **magnetoestricción** o **magnetoelasticidad** es una propiedad de algunos materiales ferromagnéticos en los cuales el material se expande o contrae cuando se localiza en un campo magnético. Este fenómeno se conoce como **efecto Villari**. El elemento sensible es una **guía de onda**, consistente en un alambre o tubo largo y delgado de material ferromagnético. En la **figura 10.27** se muestra como ejemplo la construcción y el funcionamiento de un sensor de posición magnetoestrictivo.

En este caso, se induce un pulso en la guía de onda por la interacción momentánea de dos campos magnéticos, uno proveniente de un imán de referencia y el otro de un pulso de corriente impulsado a lo largo de la guía de onda. La interacción, a su vez, produce un pulso de deformación que viaja a lo largo de la guía de onda. Este fenómeno se conoce como **efecto Wiedman**.

El pulso producido viaja a través de la guía de onda a la velocidad de la luz y es detectado en la cabeza sensora. La posición del imán se determina midiendo el tiempo transcurrido desde el lanzamiento del pulso electrónico, hasta la llegada del pulso de deformación. El pulso de corriente aplicado inicialmente se conoce como **pulso de interrogación**.

Las aplicaciones más inmediatas de los sensores magnetoestrictivos son la medida de fuerza, par y presión en automóviles e industrias mecánicas. La distribución del flujo magnético puede ser constante o variar al aplicar una carga mecánica. En este último principio se basan los presductores y los torductores. Ω

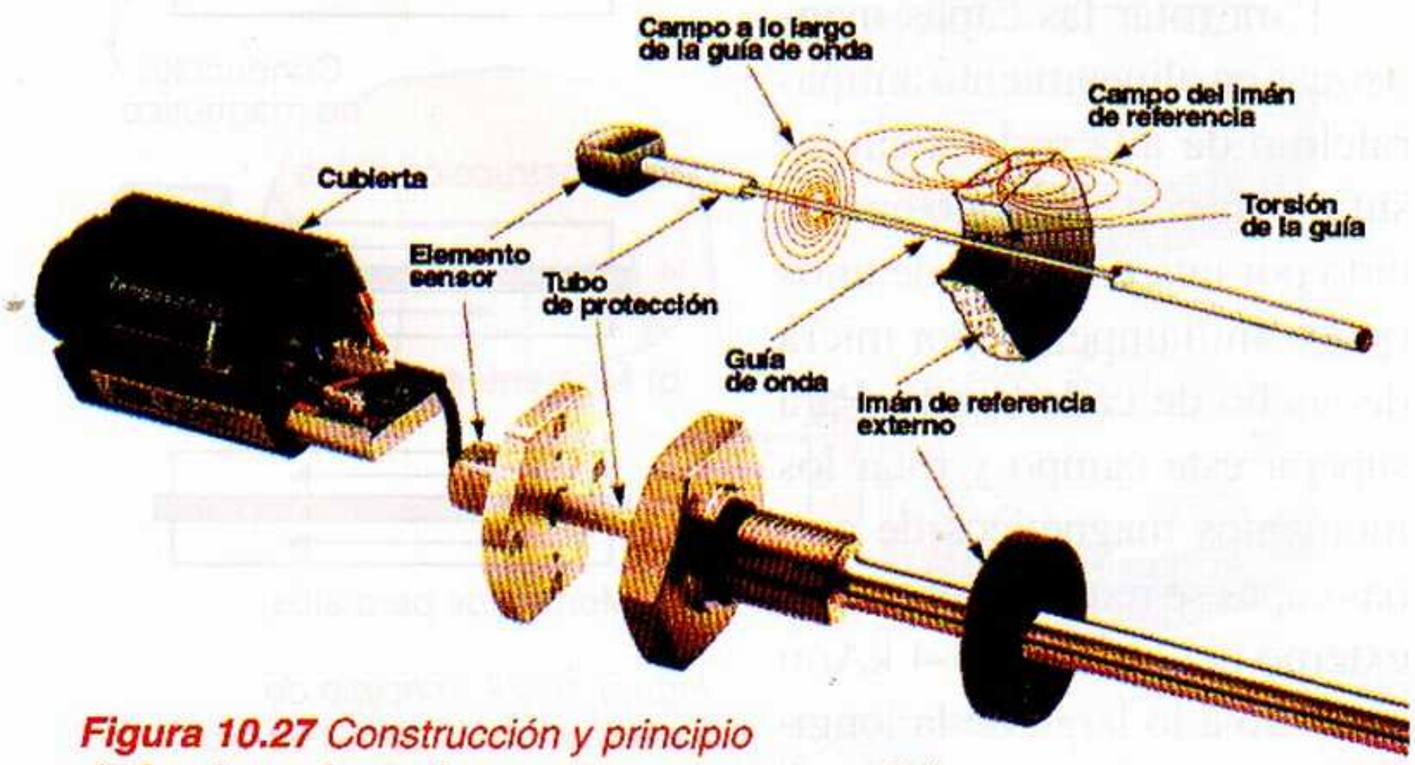


Figura 10.27 Construcción y principio de funcionamiento de un sensor magnetoestrictivo

Capítulo 11

Sensores ópticos

Actualmente se dispone de una gran variedad de tipos de sensores ópticos adecuados para aplicaciones industriales. En este capítulo examinaremos a grandes rasgos algunos de ellos, incluyendo las fotoceldas, los fotodiodos, los sensores de triangulación láser, los sensores de fibra óptica y los sensores de imagen CCD. También revisaremos algunos conceptos fundamentales relacionados con los sistemas de visión e inspección, los cuales han revolucionado los métodos de manufactura y control de calidad de productos.

Generalidades

Los **sensores ópticos** son dispositivos que responden de una u otra forma a cualquier tipo de radiación óptica, incluyendo luz visible, infrarroja (IR), ultravioleta (UV), etc. Su necesidad e importancia para medir, controlar, monitorear e inspeccionar procesos y máquinas industriales es obvia e innegable, **figura 11.1**. Los mismos se utilizan, por ejemplo, para detectar proximidad y presencia, medir temperatura, velocidad, nivel, humedad, etc.; determinar propiedades físicas y químicas de sustancias, inspeccionar la calidad de productos, etc. Todo ello sin necesidad de un contacto físico directo.

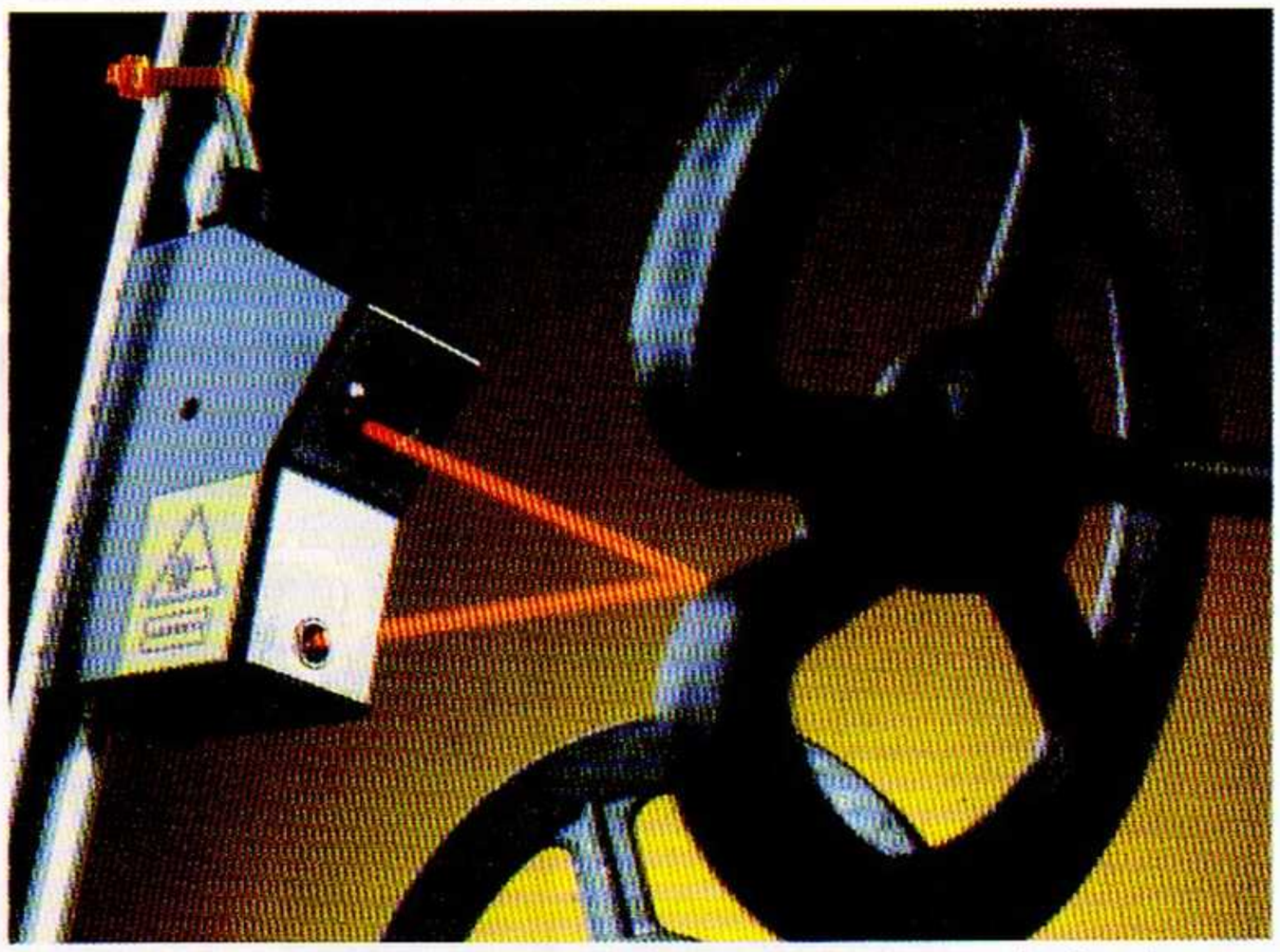


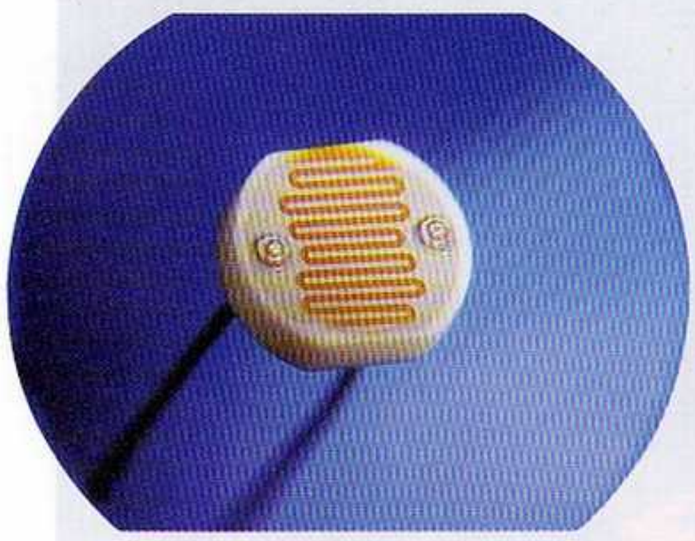
Figura 11.1 *Debido a su durabilidad y longevidad, las tecnologías de no contacto basadas en sensores ópticos son particularmente apropiadas para aplicaciones robustas y donde la seguridad es crítica. El dispositivo mostrado en la fotografía, fabricado por Schaevitz Sensors y basado en luz láser, es apropiado para medición de distancias, análisis de vibraciones y aplicaciones de alineamiento/posicionamiento.*

Fotoceldas

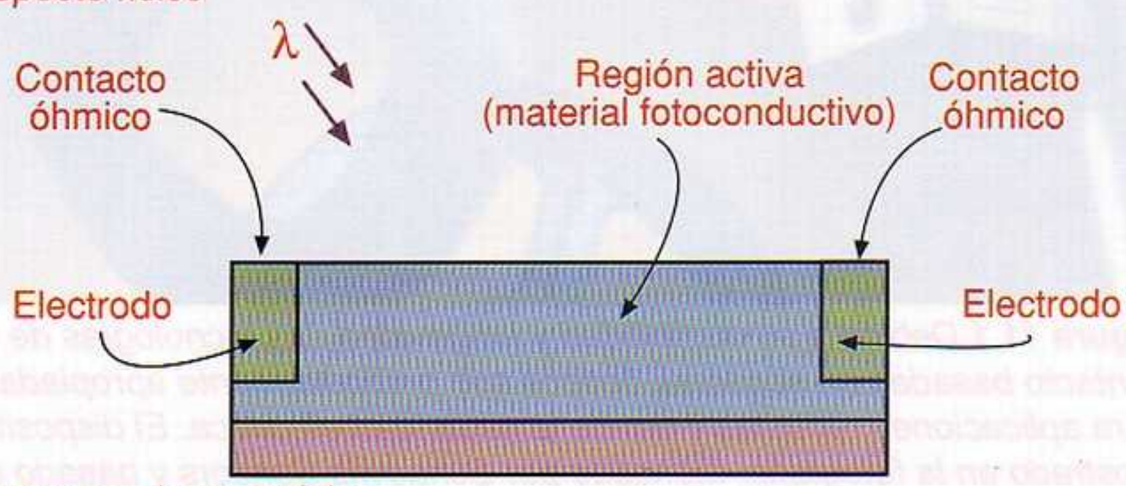
Las **fotoceldas** o celdas fotoeléctricas, son dispositivos cuya resistencia o voltaje de salida varía en respuesta a la cantidad de luz incidente sobre su superficie. En el primer caso se habla de **celdas fotoconductivas** y en el segundo de celdas **fotovoltaicas**. Estas últimas ofrecen una mejor linealidad que las primeras y son más rápidas, pero requieren mayor amplificación. Ambos tipos son muy utilizados en una gran variedad de aplicaciones industriales, incluyendo la detección de la presencia o ausencia de objetos, y la medición del grado de translucidez o luminiscencia de sólidos o fluidos, lo cual representa una medida de su densidad, temperatura, humedad, u otra variable de proceso importante.

Las **celdas fotoconductivas**, en particular, también llamadas **fotorresistencias** o **LDR** (*Light Dependent Resistors*), **figura 11.2**, basan su funcionamiento en la variación de la resistencia eléctrica de un semiconductor al incidir en él una radiación óptica. Este cambio es debido a la variación de la conductividad del material, la cual, a su vez, depende del número de portadores que saltan de la banda de valencia a la de conducción. La energía necesaria para provocar este salto la provee la radiación óptica externa. Se trata realmente de potenciómetros controlados por luz cuya resistencia en condiciones de oscuridad es máxima, digamos 1 MΩ, y disminuye a medida que se incrementa el nivel de luz incidente. El rango de variación es usualmente del orden de 10 000 a 1.

Las fotorresistencias se fabrican a partir de diversos compuestos y materiales, dependiendo de la longitud de onda que se quiere detectar y la respuesta espectral deseada. En la zona visible (0.38 a 0.75 μm) y del infrarrojo muy cercano (0.75 a 1.4 μm) se emplean compuestos de cadmio (SCd, SeCd, TeCd). En la zona del infrarrojo cercano (1.4 a 3 μm) se emplean compuestos de plomo (SPb, SePb, TePb). En la zona del infrarrojo medio (3 a 14 μm) y lejano (hasta 1 mm) se emplean compuestos de indio (SbIn, AsIn), telurio y aleaciones de telurio, cadmio y mercurio, así como germanio y silicio dopados. La estructura mostrada en la **figura 11.2b** corresponde a una fotocelda de SCd (sulfuro de cadmio).



(a) Aspecto físico



(b) Estructura interna típica

***Figura 11.2**. Fotorresistencias*

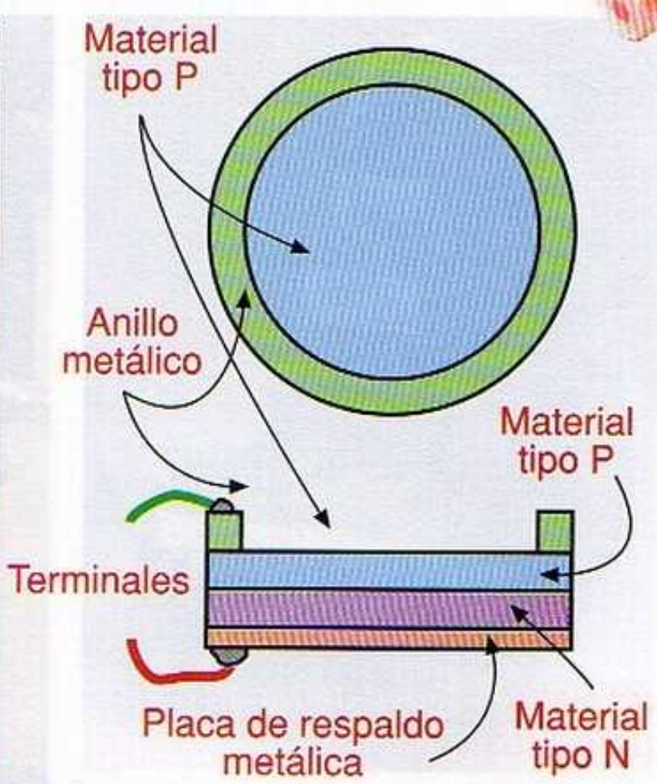
Sensores basados en uniones semiconductoras

Como hemos visto en capítulos anteriores, el empleo de materiales semiconductores, intrínsecos o dopados, es una práctica muy común en la fabricación de sensores, incluyendo galgas extensiométricas, termistores, magnetorresistencias, dispositivos de efecto Hall, fotorresistencias, resistencias detectoras de gases, etc. La razón es simple: en estos materiales se manifiestan en forma útil muchos fenómenos importantes, los cuales provocan que su conductividad eléctrica varíe de manera predecible y controlable en función de la temperatura, la luz, las deformaciones mecánicas, los campos eléctricos y magnéticos, la absorción de diversas sustancias, y otras variables físicas y químicas.

De particular interés son los sensores basados en las propiedades de las uniones PN, resultantes de la combinación de materiales semiconductores tipos P y N en una misma pastilla. Este tipo de estructuras se prestan a técnicas de fabricación en gran escala y permiten obtener sensores ópticos, magnéticos, térmicos, etc., sencillos y económicos. Además, posibilitan la integración, junto al sensor, de diversas funciones de acondicionamiento y procesamiento de señales. A continuación se examinan las características generales de las celdas fotovoltaicas, los fotodiodos y los fototransistores, que son los sensores ópticos basados en uniones PN más simples.

Las **celdas fotovoltaicas, figura 11.3**, son dispositivos que generan un potencial eléctrico cuando son iluminados. De este modo, si se conecta una celda fotovoltaica iluminada a un circuito, fluirá una corriente a través de este último. Las celdas fotovoltaicas dependen para su funcionamiento de la formación de una barrera de potencial en una unión PN cuando se irradia la misma con una radiación visible o invisible de capacidad energética suficiente para superar la anchura de la banda prohibida. A la generación de un voltaje, cuando una radiación ioniza una zona donde hay una barrera de potencial, se la denomina **efecto fotovoltaico.**

(a) Aspecto físico



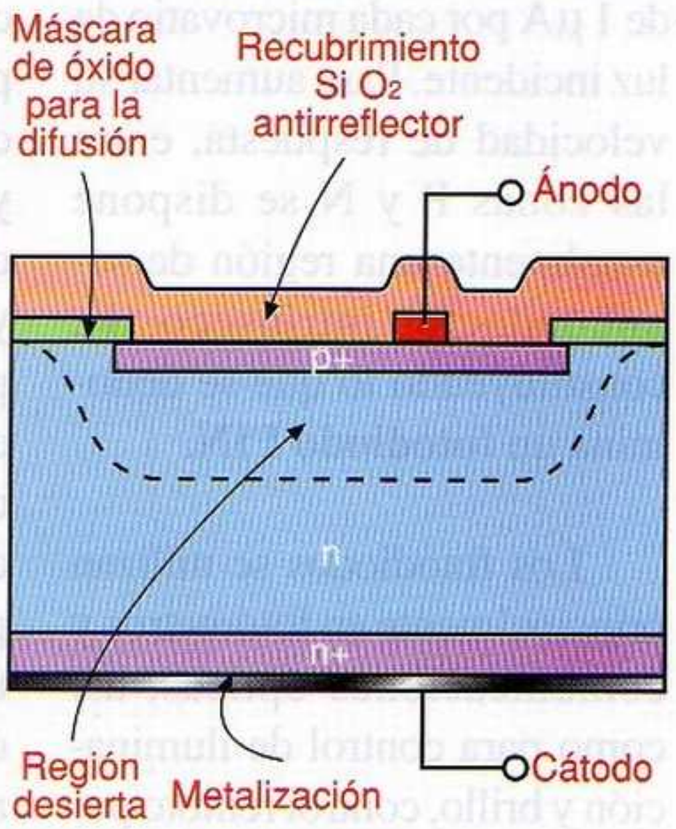
(b) Estructura interna típica

Figura 11.3 Celdas fotovoltaicas

Las celdas fotovoltaicas pueden ser de metal/semiconductor, de selenio o de silicio, dependiendo del tipo de unión. La estructura mostrada en la **figura 11.3b** corresponde a una fotocelda de silicio. En este caso, la unión PN la forman una capa de material tipo N depositada sobre un sustrato metálico y una capa de material tipo P difundida en el silicio. Esta última actúa como superficie fotosensible. El voltaje de salida es del orden de 0.27 a 0.6V.

Los **fotodiodos, figura 11.4**, son diodos de unión PN de alta velocidad y alta eficiencia, empacados en una cápsula transparente y diseñados para proporcionar una baja figura de ruido y una baja corriente de fuga. Operan en forma similar a las celdas fotovoltaicas, excepto que se polarizan inversamente para tener un mayor control sobre la anchura de la región desierta. Al incidir la luz sobre la unión, se crean pares electrón-hueco

(a) Aspecto físico



(B) Estructura interna típica

Figura 11.4 Fotodiodos

(a) Sensor digital de rango (DRS) (CyberOptics)
(b) Máquina de medición de coordenadas (SMX Corp.)
(c) Sistema de alineamiento (Monarch Monitoring)
(d) Detector de moléculas de agua (IDEC)

Figura 11.5 Sensores basados en láser para aplicaciones industriales

y por lo tanto circula una corriente a través del circuito externo. Esta última es del orden de 1 μA por cada microvatio de luz incidente. Para aumentar su velocidad de respuesta, entre las zonas P y N se dispone usualmente una región de semiconductor intrínseco (I), constituyendo lo que se denomina un **fotodiodo PIN**.

Los fotodiodos se utilizan principalmente en fotómetros y comunicaciones ópticas, así como para control de iluminación y brillo, control remoto por infrarrojos, monitoreo de llamas de gas y de petróleo, enfoque automático y control de exposición en cámaras. Combinados con una fuente de luz se emplean en codificadores de posición, detectores de proximidad y de presencia, medidores de distancia, espesor, transparencia y posición, etc. También se dispone de fotodiodos sensores de color, utilizados para inspección y control de calidad, así como de arreglos que se emplean en codificadores absolutos, lectoras de tarjetas codificadas, reconocimiento de caracteres y formas, clasificación de documentos, etc.

Los **fototransistores** son combinaciones integradas de fotodiodos y transistores NPN o Darlington donde la corriente de base la proporciona la corriente de fotones producida en la unión base-colector por la radiación óptica incidente. Los mismos entregan más corriente de salida que los fotodiodos para un mismo nivel de luz, pero son más lentos y su ganancia no es constante, sino que depende de la corriente y, por tanto, del nivel de iluminación. Debido a esto último, son menos empleados que los fotodiodos para la medición de luz. Sin embargo, resultan muy interesantes para aplicaciones de conmutación.

Sensores láser

La luz **láser** es un tipo particular de radiación óptica altamente direccional, monocromática y coherente que se produce cuando, mediante un proceso de bombeo o emisión estimulada, se excitan masivamente los electrones de ciertas sustancias a niveles energéticos más altos que sus niveles de reposo. Cuando estos electrones retornan a sus niveles normales, emiten paquetes de fotones, es decir de energía luminosa, perfectamente coordinados en términos de tiempo (fase), dirección y longitud de onda (frecuencia o color). Por extensión, cualquier tipo de fuente que produzca este tipo de luz se denomina también un **láser**.

Actualmente los láseres, en sus distintos tipos y variantes, se utilizan a nivel industrial para medir distancias, determinar coordenadas, controlar la uniformidad de superficies, alinear objetos, detectar moléculas de agua en líquidos, y otras aplicaciones importantes, **figura 11.5**. Aunque hasta hace algunos años, la principal fuente de luz láser disponible eran los tubos láser de helio-neón (He-Ne), la introducción del diodo láser a finales de la década de 1980 abrió un mundo completamente nuevo de posibilidades, situando esta tecnología al alcance de todo el mundo.

Uno de los sectores industriales donde la tecnología láser ha tenido mayor impacto es el mercado de los sensores de proximidad, desplazamiento y posición. Estos dispositivos operan principalmente por **reflexión** o por **triangulación**. En el primer caso, el sensor emite un haz de luz visible desde un diodo láser, el cual golpea la superficie del objeto y se refleja, siendo captado generalmente por un detector de posición o PSD (*position sensitive detector*). El desplazamiento del objeto cambia el ángulo de incidencia del haz, y por tanto su posición sobre el detector. Este último, junto con la electrónica de procesamiento de señales asociada, produce una corriente o un voltaje proporcional al desplazamiento del objeto.

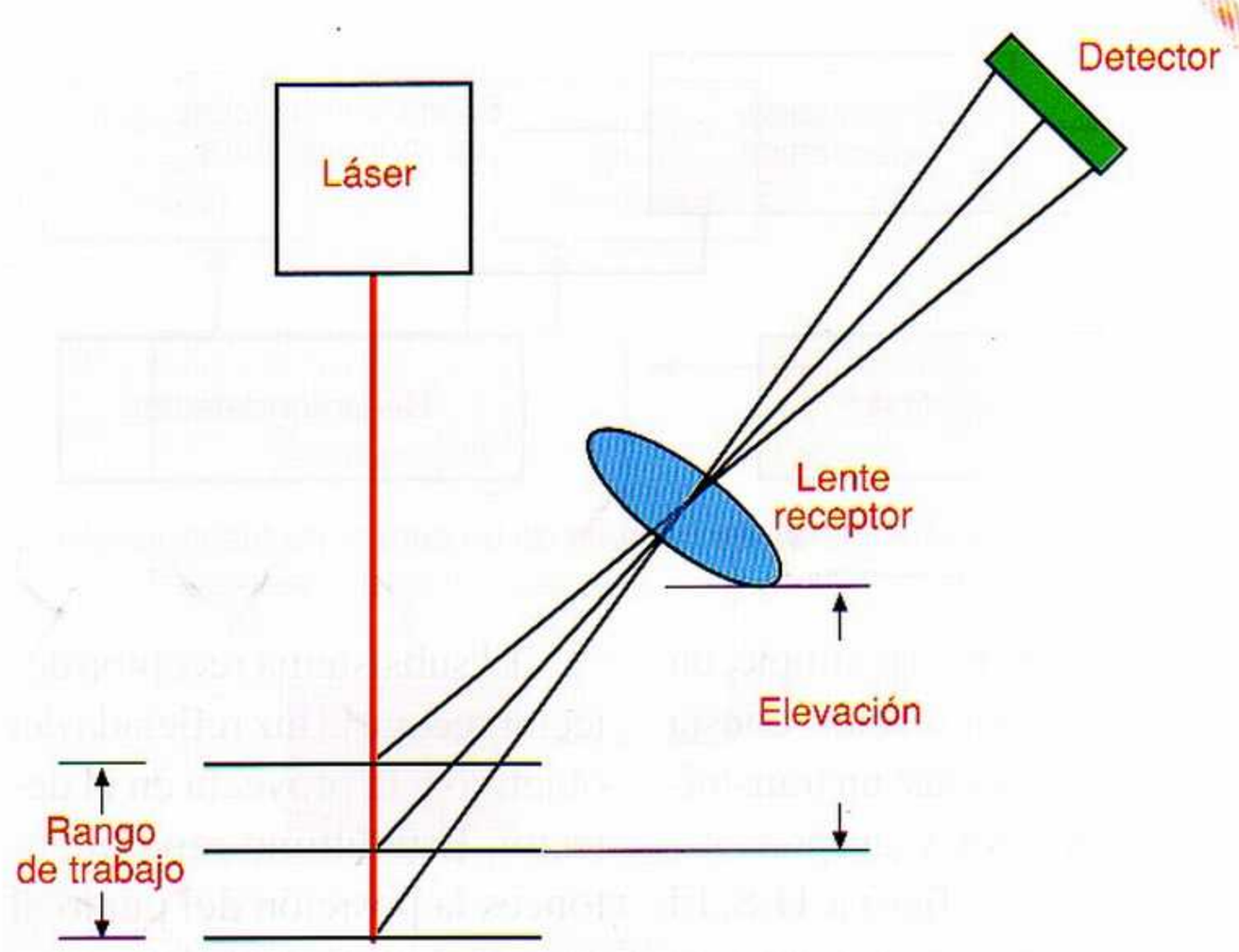


Figura 11.6 Principio de funcionamiento de un sensor de triangulación difuso

Los **sensores de triangulación**, por su parte, **figura 11.6**, trabajan proyectando un haz de luz sobre el objeto de interés (objetivo) y midiendo la distancia que el haz reflejado, captado por un detector, se desplaza con respecto a un punto de referencia. A medida que el punto de luz incidente sobre el objeto se acerca o aleja del punto de referencia, como resultado de los cambios en la altura del objetivo, cambia también la posición del punto sobre el detector. En algunos casos se utiliza un sistema óptico gemelo, formado por dos detectores y dos lentes idénticos, para incrementar la cantidad de luz capturada y mejorar el seguimiento del contorno de objetos irregulares. Estos dispositivos pueden detectar variaciones superficiales inferiores a 0.005 micras y sustituyen en muchos casos los tradicionales LVDT.

Los sensores de triangulación pueden ser **difusos** o **especulares**, dependiendo de las características reflectivas de los objetos que están siendo examinados, **figura 11.7**. Las superficies especulares se comportan como espejos, produciendo un patrón de reflexión predecible, mientras que las superficies difusas son irregulares, lo cual provoca reflexiones dispersas.

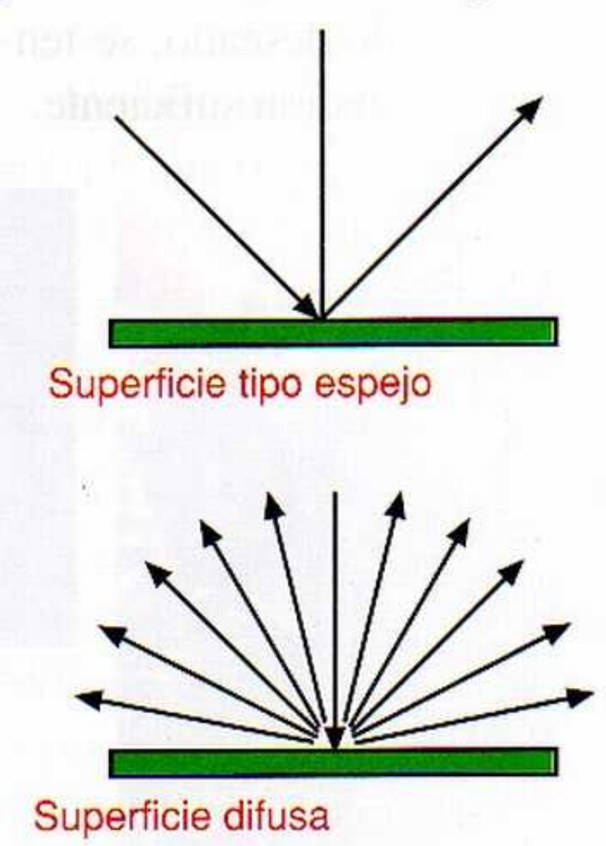


Figura 11.7 Características reflectivas de superficies especulares y difusas

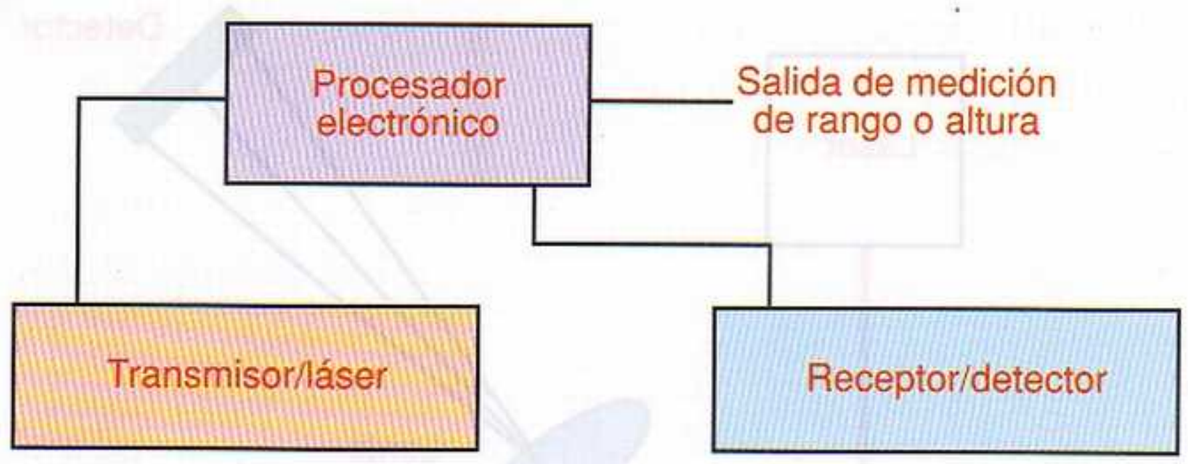


Figura 11.8 Diagrama interno de bloques de un sensor de triangulación láser típico

En su forma más simple, un sensor de triangulación consta de tres subsistemas: un transmisor, un receptor y un procesador electrónico, **figura 11.8**. El transmisor es típicamente un diodo láser de 670 nm, el cual proyecta un haz de luz visible que ilumina el objeto de interés. La óptica utilizada para manipular el láser crea un pequeño punto a la distancia de referencia. El tamaño de este punto, por ejemplo 30 micras, determina la resolución lateral espacial, es decir, el tamaño mínimo medible de cualquier detalle del objeto. Mientras el diámetro del haz sea menor o igual al tamaño del detalle deseado, se tendrá una resolución suficiente.

El subsistema receptor/detector recoge la luz reflejada del objetivo y la proyecta en el detector. Este último reporta entonces la posición del punto al procesador, el cual determina por métodos matemáticos el rango o altura. Entre los muchos tipos de detectores ópticos disponibles, los dos más comunmente usados para sensores de triangulación láser son los sensores de posición o **PSD** (*position sensing detectors*) y los arreglos pixelados o **PAD** (*pixelized array detectors*).

Los **PSD** son dispositivos análogos con dos salidas de corriente, cada una proporcional a la posición del punto. Ambas corrientes son iguales cuando el punto está en la mitad del detector y cambian a medida que el punto se mueve fuera del centro. A partir de este cambio relativo se puede calcular la posición del punto.

Los **arreglos pixelados**, por su parte, son dispositivos digitales que producen como salida una serie de voltajes discretos, cada uno de los cuales representa la cantidad de luz en un elemento del detector. Un detector de 256 elementos, por ejemplo, produce 256 muestras discretas de voltaje en su salida, fácilmente convertibles en palabras de 8 bits.

Este tipo de sensores requieren más procesamiento de señales que los PSD, son más lentos y ocupan mayor área. Sin embargo, debido a que visualizan inherentemente la distribución de intensidad del haz de luz proyectado, permi-

(a) Detector de proximidad

(b) Sensor de desplazamiento

(c) Detector de fugas de líquidos

(d) Interruptores de fibra óptica

Figura 11.9 Ejemplos de sensores basados en fibras ópticas

ten analizar exactamente la naturaleza del material o parte que está siendo examinada.

Los sensores láser pueden ser también utilizados para detectar desplazamientos por **análisis de interferencias**. Mediante este método, que constituye el núcleo de los llamados **interferómetros láser**, el haz de luz generado por un láser se divide mediante un separador en dos haces perpendiculares entre sí. Un haz se aplica directamente sobre un espejo plano fijo, mientras que el otro se refleja en el objeto cuya distancia se quiere determinar.

Los dos haces se superponen de nuevo en el separador, obteniéndose una onda resultante que pasa por una serie de valores máximos y mínimos a medida que se desplaza el objeto. Contando las crestas y valles de la interfencia, y relacionándolas con la longitud de onda del haz, se obtiene una medida muy precisa del desplazamiento.

Sensores basados en fibras ópticas

Una **fibra óptica** es un conductor óptico muy delgado a través del cual se propaga la luz. Consta de una parte central de plástico o vidrio llamada **núcleo**, un recubrimiento, también de plástico o vidrio, llamado **corteza**, y una chaqueta externa de plástico o caucho que le sirve de protección. El núcleo es el camino real de propagación de la luz y tiene un índice de refracción distinto al de la corteza.

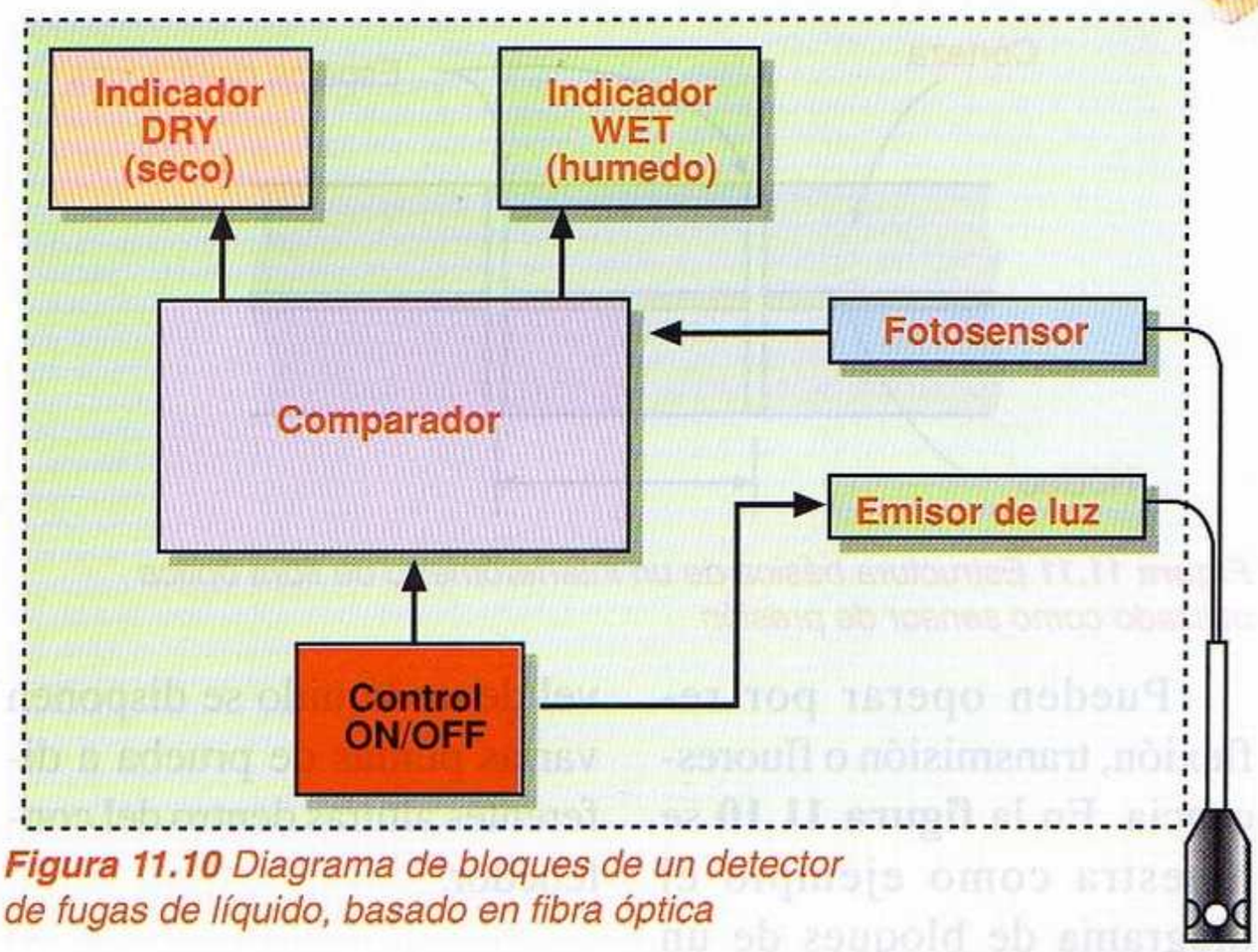


Figura 11.10 Diagrama de bloques de un detector de fugas de líquido, basado en fibra óptica

La propagación de la luz se realiza por el principio de la **reflexión total interna**, un fenómeno relacionado con la refracción. Aunque las fibras ópticas se utilizan principalmente en sistemas de comunicaciones, pueden ser también utilizadas ventajosamente como sensores de magnitudes físicas y químicas en una gran variedad de aplicaciones, **figura 11.9**.

Los sensores basados en fibras ópticas son extremadamente sensibles y versátiles, pueden detectar múltiples variables, son inmunes a la interferencia electromagnética (EMI), pueden operar a altas temperaturas durante períodos prolongados de tiempo, son mecánicamente muy flexibles y robustos, pueden trabajar en presencia de gases y líquidos volátiles o corrosivos, son compatibles con sistemas ópticos de telemetría, pueden ser ubicados a grandes distancias y, en general, toleran condiciones ambientales difíciles. Sin embargo, tienen también sus limitaciones, siendo una de las más importantes su alto costo.

Un sistema de medida basado en una fibra óptica como sensor requiere, además de la fibra, de una fuente de luz, que puede ser un LED infrarrojo (IR) o láser, y de un fotodetector. Dependiendo del papel desempeñado por la fibra se habla de sensores **extrínsecos** y de sensores **intrínsecos**. En los primeros, la fibra transporta la luz, la cual es modificada o modulada en un elemento externo bajo la acción de la magnitud a medir.

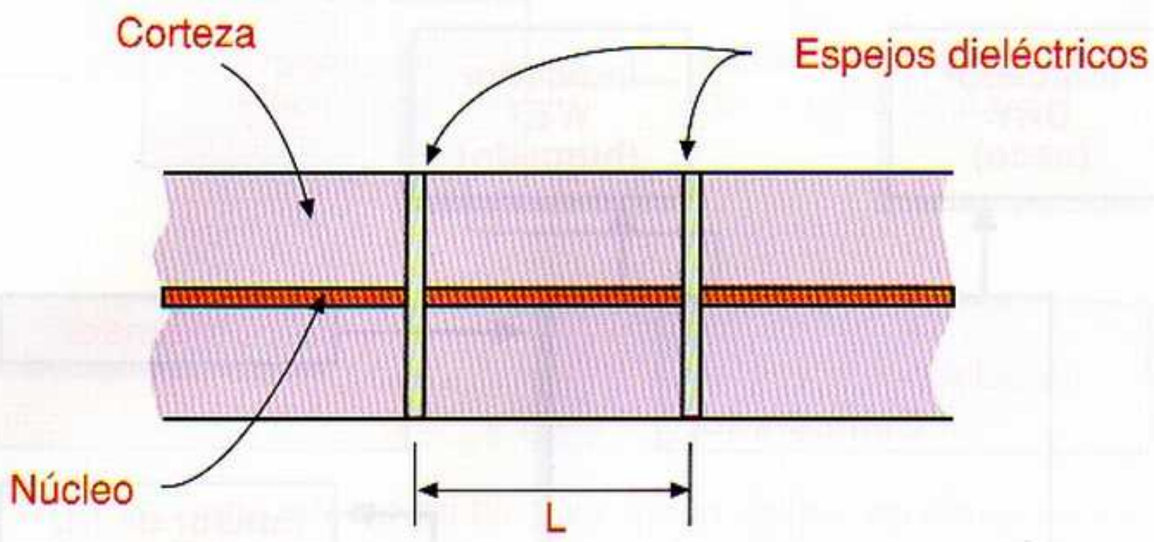


Figura 11.11 Estructura básica de un interferómetro de fibra óptica utilizado como sensor de presión

Pueden operar por reflexión, transmisión o fluorescencia. En la **figura 11.10** se muestra como ejemplo el diagrama de bloques de un sensor de fibra óptica basado en técnicas de reflexión y diseñado para detectar fugas y niveles de líquidos, incluyendo combustibles.

En este caso, la luz proveniente de un LED se acopla en una fibra óptica y se envía a la punta de prueba en contacto con el líquido, cuya superficie la refleja parcialmente. La luz reflejada se amplifica dentro de la punta de prueba, se acopla a la fibra receptora y se retorna al módulo de control, donde es detectada por un fotodetector de silicio y convertida en una señal de voltaje equivalente.

Esta señal alimenta un comparador, el cual activa un LED indicador de «seco» (DRY) o «humedo» (WET), dependiendo del nivel de señal recibido. Si no hay líquido, se dispara el indicador de «seco». Para monitorear el nivel de un líquido se disponen varias puntas de prueba a diferentes alturas dentro del contenedor.

En los sensores **intrínsecos**, la magnitud a medir afecta las características ópticas de la fibra, ya sea directamente o a través de un recubrimiento dispuesto especialmente para este propósito, modulando la señal de luz. Los cambios inducidos pueden afectar la intensidad de la radiación óptica o su fase. En el primer caso, la magnitud a medir provoca, por ejemplo, microdeformaciones en la fibra o variaciones en el índice de refracción del núcleo, mientras que en el segundo, causa perturbaciones detectables por interferometría. En la **figura 11.11** se muestra como ejemplo un interferómetro de fibra óptica utilizado para medir presión.

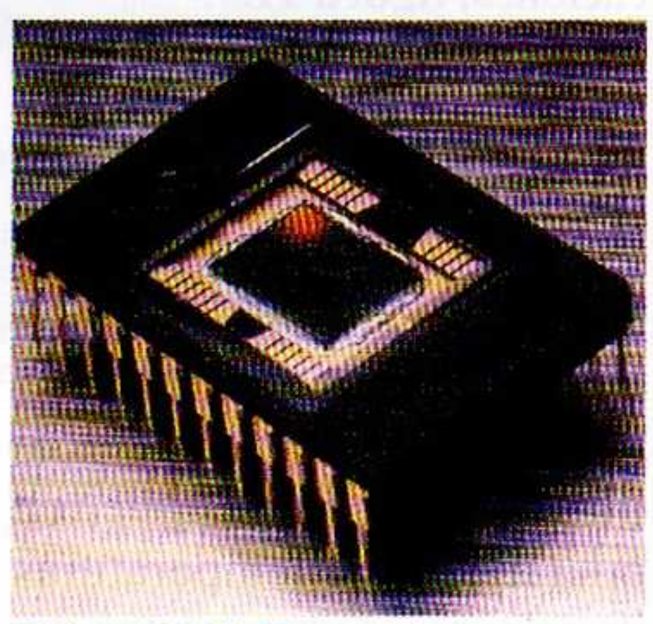


Figura 11.12 Sensor de imagen CCD de alta resolución (Kodak)

El elemento sensor, llamado un FFPI (*fiber Fabry-Perot interferometer*), consiste de dos espejos internos separados por un tramo de longitud L de fibra óptica monomodal. En la fibra se acopla la luz proveniente de un láser semiconductor y una parte de la luz reflejada se convierte, mediante un detector, en una señal eléctrica. Cualquier cambio en la magnitud de interés (presión, en este caso) provoca un cambio correspondiente en la longitud L. El nivel de la potencia reflejada lo determina la interferencia de los haces de luz coherente provenientes de los dos espejos. Los FFPI pueden ser también utilizados para medir esfuerzos mecánicos, campos magnéticos, temperatura, y otras variables.

Sensores de imagen

Los **sensores de imagen**, como su nombre lo indica, son dispositivos que capturan imágenes del mundo real, las exploran secuencialmente y producen como salida una réplica eléctrica de las mismas. La tecnología de sensores de imagen estándar de la industria es la de los **dispositivos de cargas acopladas** o **CCD** (*charge coupled devices*), **figura 11.12**, desarrollada en los loboratorios Bell a finales de la década de 1960.

Un CCD es un arreglo bidimensional de detectores fotosensibles que acumulan una imagen en la forma de elementos discretos llamados **pixeles** y se leen por desplazamiento. El procesamiento de imágenes se realiza en tres pasos:

1. Exposición. La luz proveniente de la imagen incide en el arreglo de pixeles, donde los fotones son convertidos en pares electrón-hueco. El número de electrones recolectados en cada pixel depende del nivel de luz, el tiempo de exposición y la longitud de onda de la radiación incidente.

2. Transferencia de carga. Los paquetes de carga almacenados en la arquitectura de pixeles se mueven o desplazan dentro del sustrato de silicio con el fin de alcanzar el amplificador de salida. A medida que se mueve la carga asociada con un pixel en una fila o columna del arreglo, se desplaza también la carga en todos los pixeles asociados con esa fila o columna.

3. Conversión de carga a voltaje. Los paquetes de carga desplazados hacia el nodo sensor de salida son convertidos en un voltaje equivalente. La señal así obtenida, que representa la imagen original, es amplificada y procesada de acuerdo a los requisitos de la aplicación.

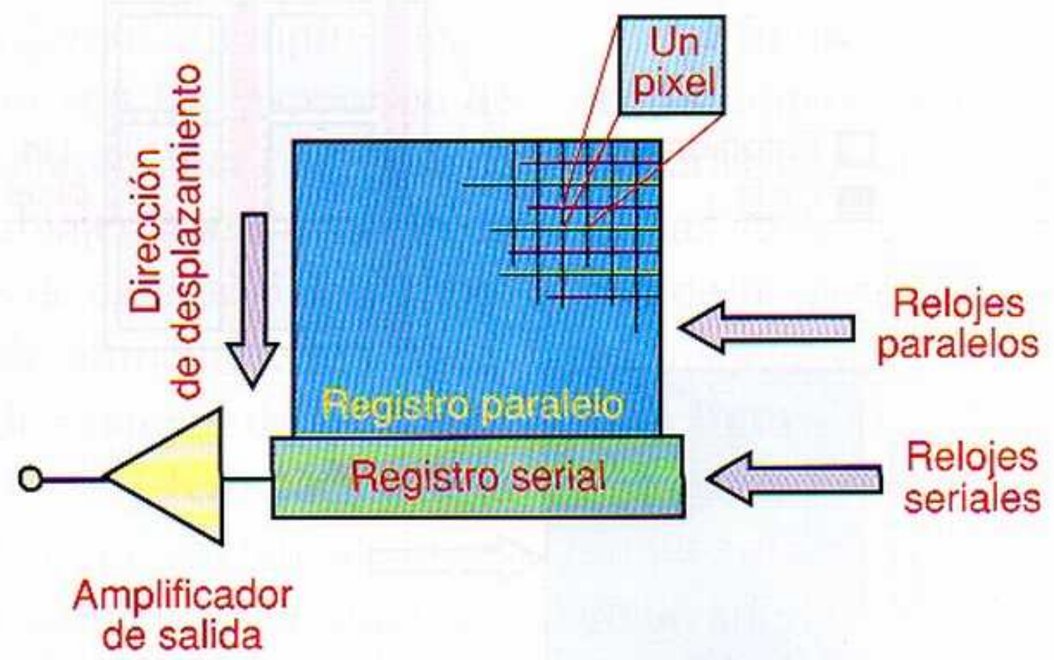


Figura 11.13 CCD de transferencia de cuadros completos (FF).

Dependiendo de la forma como se explora la imagen y se realiza la transferencia de carga, los CCD pueden ser de varios tipos. Las arquitecturas más comunes son la **FF** (*full-frame*) o de cuadros completos, la **FT** (*frame-transfer*) o de cuadro a cuadro y la **IL** (*interline*) o de entrelazado. Cada uno de estos enfoques tiene sus propias ventajas y desventajas.

Los **dispositivos FF**, en particular, **figura 11.13**, utilizan fotocondensadores MOS como detectores y son los de concepción más simple. Están formados básicamente por dos registros de desplazamiento CCD, uno paralelo y uno serial, y un amplificador de salida. Las imágenes se proyectan ópticamente en el arreglo paralelo, el cual actúa como el plano de imagen. Para su lectura, las cargas resultantes se transfieren fila por fila al registro serial, y pixel por pixel al amplificador. El proceso se repite hasta que se transfieren todas las filas, punto en el cual el arreglo queda listo para la siguiente exposición.

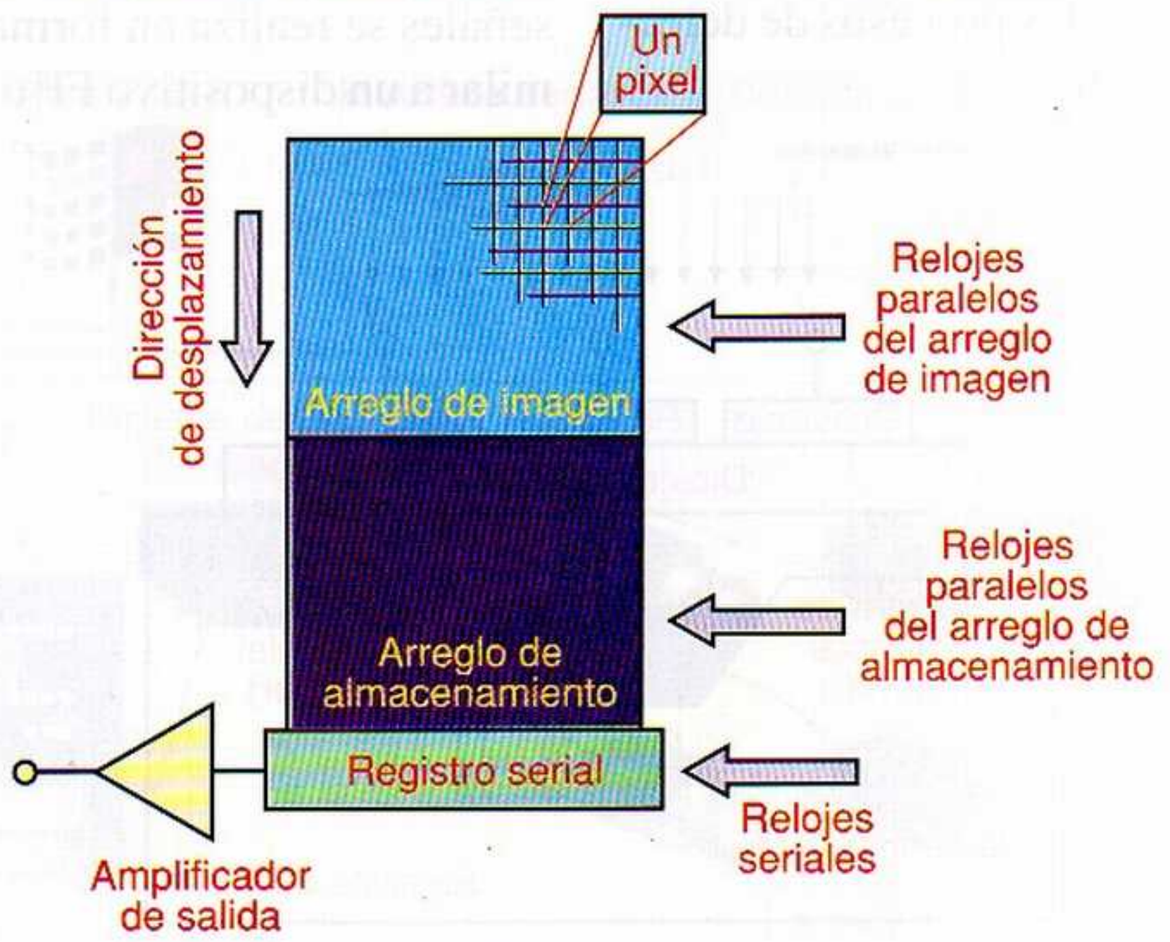


Figura 11.14 Arquitectura de CCD de transferencia de cuadro a cuadro (FT)

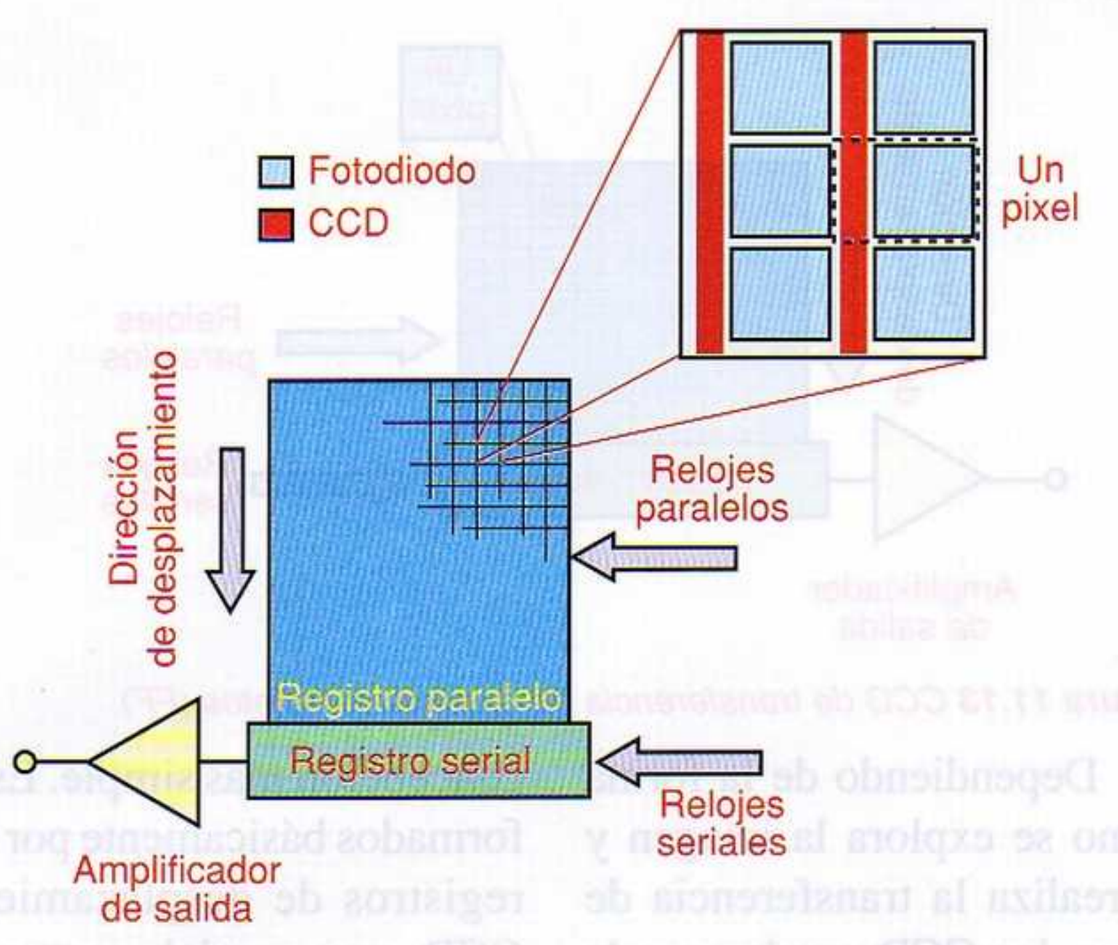


Figura 11.15 Arquitectura de un CCD de entrelazado (IL)

Los **dispositivos FT, figura 11.14**, son similares a los FF, excepto que poseen un registro paralelo separado idéntico, llamado *arreglo de almacenamiento*, el cual, al contrario del de imagen, no es sensible a la luz. La idea es desplazar rápidamente una escena capturada, desde el arreglo de imagen hasta el de almacenamiento, con el fin de agilizar los procesos de detección y lectura.

Finalmente, los **dispositivos IL, figura 11.15**, separan las funciones de detección y lectura utilizando pixeles compuestos de fotodiodos aislados entre líneas de CCD blindados o insensibles a la luz. Una vez integrada una escena, la carga recolectada en cada fotodiodo de un pixel se transfiere al CCD asociado. A partir de entonces, el procesamiento de señales se realiza en forma similar a un dispositivo FF o FT.

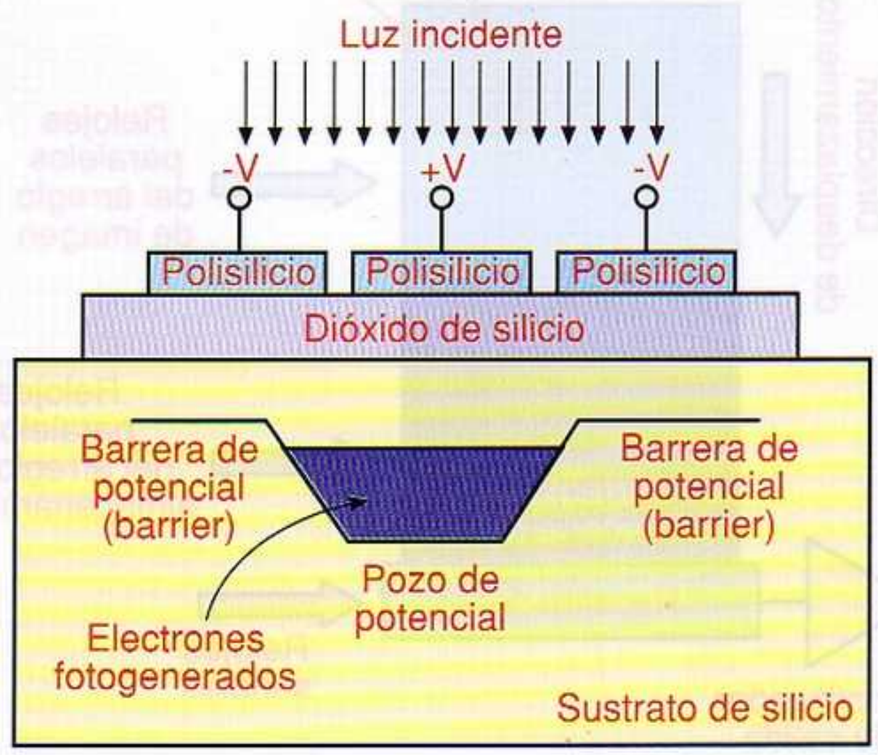


Figura 11.16 Estructura interna de un dispositivo CCD

Los CCD, en general, siguen los principios básicos de la física de dispositivos MOS, **figura 11.16**. Al aplicar una diferencia de potencial a la compuerta, cambian los potenciales en el silicio. Con un voltaje apropiado, se forma un pozo de potencial, el cual recolecta los electrones localizados creados por la luz incidente. Estos electrones se confinan bajo la compuerta formando zonas de alto potencial llamadas *barriers*, las cuales rodean el pozo.

Los CCD basados en silicio son monocromáticos, es decir no tienen la habilidad para determinar la cantidad de información RGB (rojo, verde y azul) presentada a los pixeles. Para extraer la información de color de una escena dada, la industria utiliza básicamente tres técnicas:

Sistemas de color secuencial. La imagen se crea tomando tres exposiciones sucesivas mientras se conmutan filtros ópticos que tienen las características RGB deseadas. La imagen resultante se reconstruye fuera del *chip*.

Sistemas de color de tres chips. La escena se divide ópticamente en tres planos de imagen separados, cada uno asociado a un sensor CCD y a un filtro de color. Las imágenes de color se detectan entonces sincronizando las salidas de los tres CCD.

Arreglos de filtros de color (CFA). Se realizan los filtros de color sobre el *chip* durante el proceso de fabricación utilizando patrones de *foto-resist* tinturado. Así se reduce la complejidad del sistema, aunque se sacrifica en parte la resolución efectiva.

Sistemas de visión

Los sistemas de visión son herramientas de control de calidad completas e integrales, desarrollados alrededor de cámaras con sensores de imagen, que realizan tareas de inspección visual, ayudan a resolver problemas de manufactura y, en muchos casos, controlan automáticamente todo el proceso de fabricación de un producto. La visión de máquina es ampliamente utilizada en una gran variedad de procesos industriales en los cuales son importantes la confiabilidad y la precisión en la ejecución de tareas repetitivas.

Algunos ejemplos de lo anterior son las inspección de partes automotrices en líneas de ensamblaje, la verificación de fechas de expiración en empaques de alimentos, la inspección de códigos de barras en productos, la verificación de la presencia y contenido de logos de compañías, la eliminación de productos defectuosos, etc.

Actualmente, la mayoría de sistemas de visión están basados en computadores personales (PC) de bajo costo y utilizan múltiples cámaras y tarjetas de captura de imágenes para realizar varios tipos de tareas de inspección visual, **figura 11.17**. Todos ellos constan básicamente de una fuente de señal de entrada, una fuente de iluminación, un sensor de partes, un capturador de cuadros (*frame grabber*) , una PC, un *software* de visión de máquina y una tarjeta de interfaz I/O para comunicarse con el mundo externo.

La **fuente de señal de entrada** consiste en una o más cámaras, con su óptica asociada, las cuales toman una imagen de la parte que está siendo inspeccionada. Las mismas, **figura 11.18**, han alcanzado actualmente un alto grado de sofisticación, ofreciendo un amplio rango de nuevas capacidades en presentaciones cada vez más inteligentes, pequeñas y rápidas. Las hay incluso **infrarrojas**, diseñadas específicamente para ver en la oscuridad y monitorear ciertas características térmicas de materiales y procesos.

La **fuente de luz**, que es típicamente una lámpara fluorescente, LED o estroboscópica, produce la luz necesaria para iluminar la parte examinada de modo que se pueda adquirir la mejor imagen posible de la misma con la cámara. De hecho, encontrar la técnica de iluminación correc-

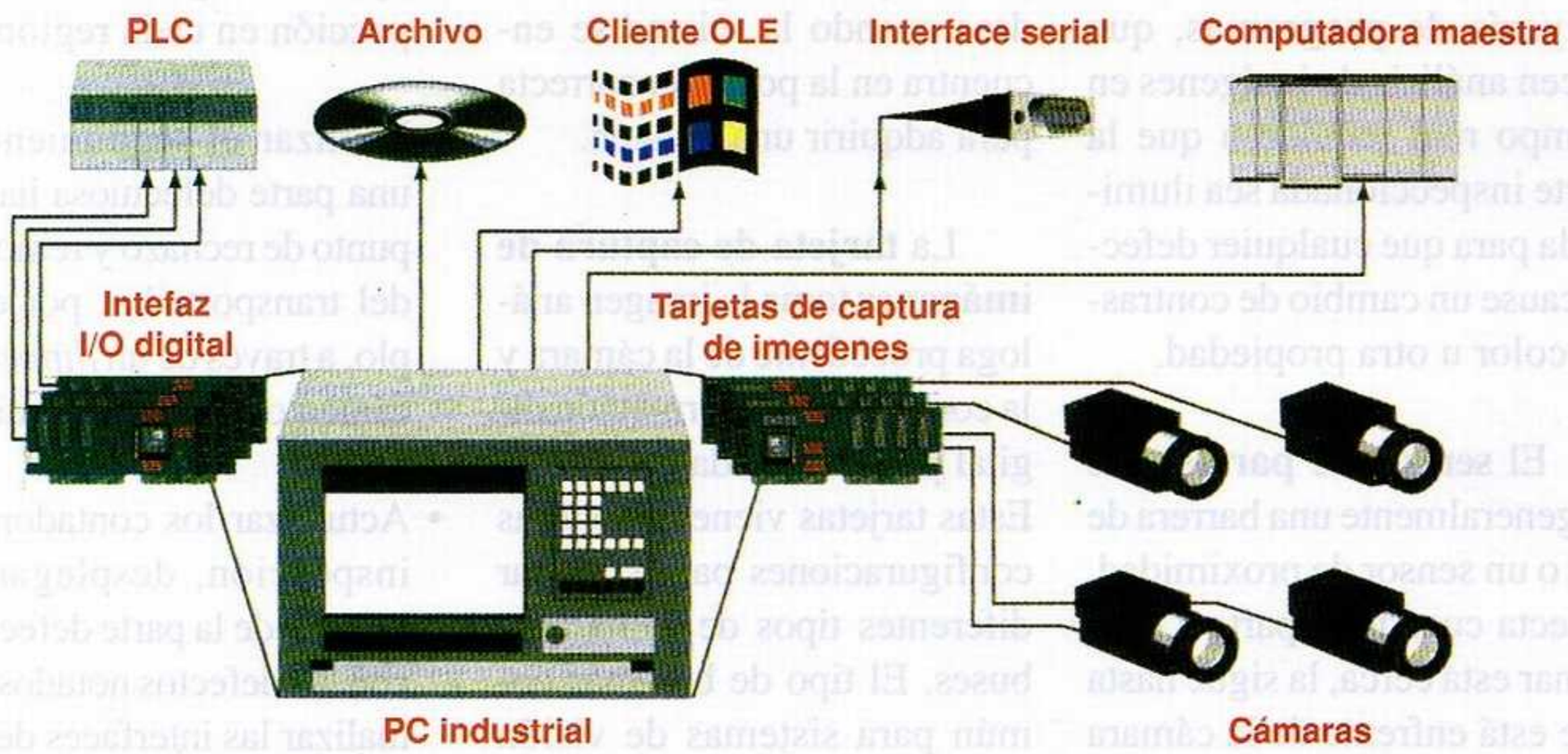


Figura 11.17 Estructura típica de un sistema de visión de máquina basado en una PC.

(a) Cámara para color (Vision Components).

(b) Cámara infrarroja (FLIR Systems).

(c) Cámara monocromática (Siemens).

(d) Cámara CCD miniatura (Pulnix).

(e) Sistema de inspección integrado (DVT)

(f) Cámara CMOS en un solo chip (Marshall Electronics).

Figura 11.18 Cámaras para sistemas de visión de máquina

ta es el primer paso al evaluar el uso de la visión de máquina en cualquier aplicación. La mayoría de programas, que hacen análisis de imágenes en tiempo real requieren que la parte inspeccionada sea iluminada para que cualquier defecto cause un cambio de contraste, color u otra propiedad.

El **sensor de partes**, que es generalmente una barrera de luz o un sensor de proximidad, detecta cuando la parte a examinar está cerca, la sigue hasta que está enfrente de la cámara y, mediante pulsos de disparo, informa a la cámara, al sistema de control de iluminación y a la tarjeta de captura de cuadros cuando la misma se encuentra en la posición correcta para adquirir una imagen.

La **tarjeta de captura de imágenes** toma la imagen análoga procedente de la cámara y la convierte en información digital para ser usada por la PC. Estas tarjetas vienen en varias configuraciones para soportar diferentes tipos de cámaras y buses. El tipo de bus más común para sistemas de visión basados en PC es el PCI.

La **computadora** o **PC**, que se encarga de procesar la información proveniente de la tarjeta de captura de cuadros, es el elemento clave en cualquier sistema de visión de máquina. El mismo debe ser físicamente robusto para soportar la vibración, el polvo y otros fenómenos comunes en ambientes industriales, y utilizar como mínimo un procesador Pentium de 133 MHz o más rápido. La velocidad es importante debido a que entre menor sea el tiempo necesario para procesar cada imagen, la línea de ensamblaje se puede mover más rápidamente. La computadora de un sistema de visión de máquina realiza, entre otras, las siguientes funciones generales:

- Analizar la imagen para localizar la parte inspeccionada y determinar las regiones de interés para inspección.
- Ejecutar algoritmos de inspección en cada región.
- Realizar el seguimiento de una parte defectuosa hasta el punto de rechazo y removerla del transportador, por ejemplo, a través de un *flipper* mecánico o un chorro de aire.
- Actualizar los contadores de inspección, desplegar una imagen de la parte defectuosa con los defectos notados y actualizar las interfaces de control de proceso y control.

El **software** de visión de máquina ejecuta el programa de inspección, procesa los datos que llegan y realiza decisiones del tipo "pasa/no pasa". Actualmente se dispone de diferentes tipos de programas para usos muy diversos, que van desde operaciones específicas, digamos realizar una medición o calibración, hasta tareas múltiples, como leer códigos de barras, guiar robots, verificar presencia, fijar los parámetros de ajuste de la cámara, seleccionar los tiempos correctos para la adquisición y rechazo de imágenes, etc. Se estima que cerca del 70% del software de un sistema de visión se enfoca en desarrollar una interfaz que habilite al usuario para configurar y mantener fácilmente el sistema.

Una vez que un sistema de visión de máquina ha completado su tarea de inspección, debe ser capaz de comunicarse con el mundo exterior para controlar el proceso de manufactura y/o comunicar la información de "pasa/no pasa" a una base de datos. Estas operaciones las realiza generalmente a través de una tarjeta digital de interfaz I/O o de una tarjeta de red; conectadas, por ejemplo, al PLC de la línea de manufactura. De este modo, la parte defectuosa puede ser separada de las partes buenas y los resultados de la inspección transferidos al personal de control de calidad.

Dependiendo del tipo de cámaras utilizadas, los sistemas de visión de máquina pueden ser básicamente de tres tipos: monocromáticos, cromáticos e infrarrojos.

Los sistemas **monocromáticos** capturan imágenes en escalas de grises. Son los más usados en aplicaciones generales, debido principalmente a su bajo costo, alta velocidad y sencillez de procesamiento.

Los sistemas **cromáticos** o de visión en color se utilizan en aplicaciones especiales, donde los colores relativos de las partes sirven de base al proceso de inspección, y los enfoques tradicionales, utilizando imágenes monocromáticas, pueden presentar problemas.

Un ejemplo de lo anterior lo constituye la inspección del ensamblaje de tarjetas de circuitos impresos, donde los componentes deben ser insertados automáticamente en su lugar con la orientación de color correcta. El color es también muy utilizado en la industria automotriz para verificar la presencia de los componentes correctos en las líneas de ensamblaje de automóviles. Con este propósito, la mayoría de partes, desde los fusibles en las cajas de unión hasta la tapicería interior, se marcan con códigos de colores. También se utilizan colores en la industria farmacéutica, particularmente el rojo y el azul, para identificar y verificar bolsas IV, previniendo así errores durante su manipulación en hospitales.

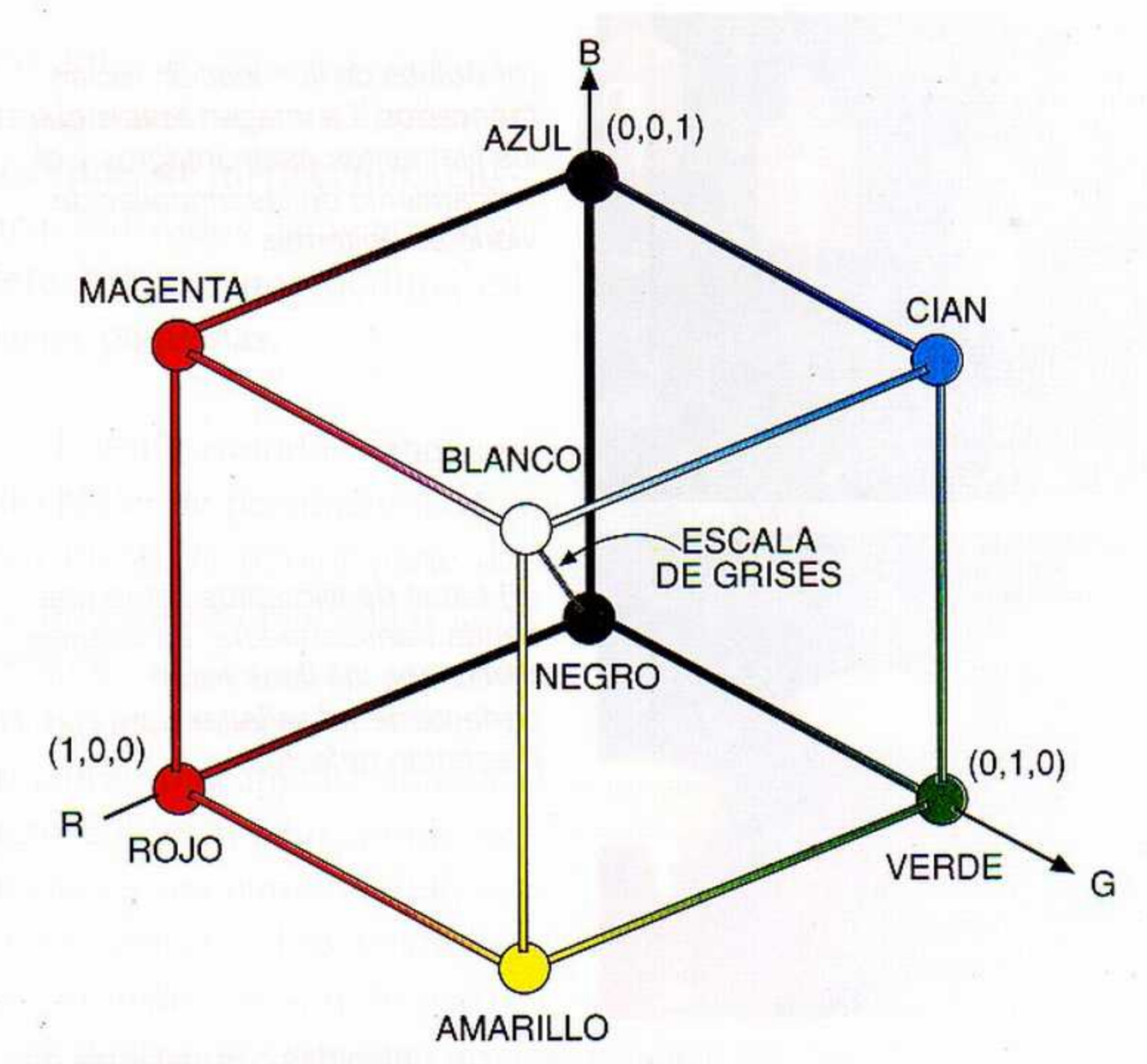


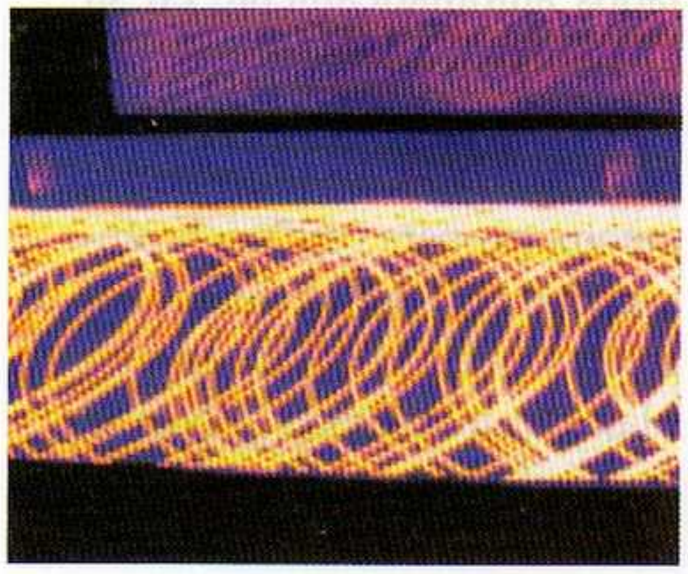
Figura 11.19 Modelo RGB para sistemas de visión en color

La mayoría de las cámaras para sistemas de visión en color utilizan el modelo o patrón RGB mostrado en la **figura 11.19**, consistente en un cubo ubicado en un espacio tridimensional de coordenadas cartesianas. En esta representación, el origen corresponde al negro, la esquina opuesta al blanco y las esquinas de cada eje a los colores primarios rojo (R), verde (G) y azul (B). La diagonal que conecta el negro con el blanco, representa la escala de grises.

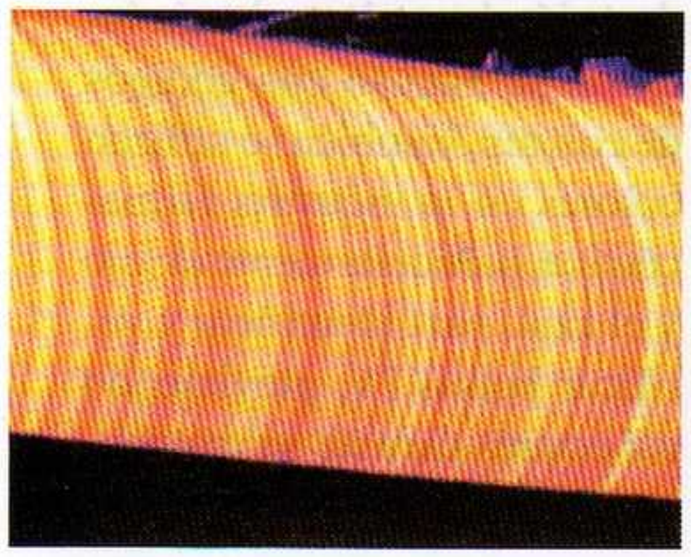
Cualquier punto en el cubo representa un color y sus coordenadas indican la cantidad de rojo, verde y azul presente en el mismo. Por ejemplo, las coordenadas del amarillo son (1, 1, 0), lo cual significa que contiene un 100% de rojo, un 100% de verde y un 0% de azul.

Finalmente, los sistemas de visión de máquina **infrarrojos** o ***IRMV*** *(InfraRed Machine Vision)* se utilizan para monitorear características térmicas específicas de procesos y materiales, las cuales son normalmente invisibles para sistemas de visión estándar.

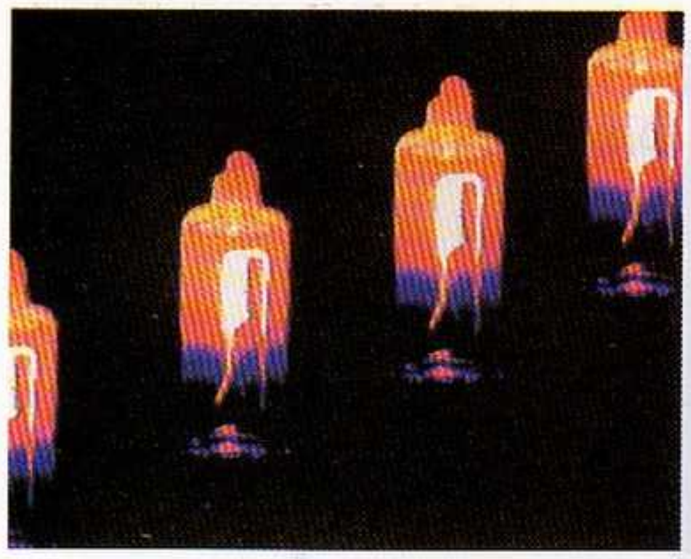
En la **figura 11.20** se muestran varios ejemplos de imágenes térmicas obtenidas con cámaras IR que evidencian la aplicación de esta tecnología. Algunas cámaras contienen un enfriador miniatura que se usa para llevar el detector IR a temperaturas criogénicas, es decir cercanas al cero absoluto, durante su operación. No obstante, la mayoría están basadas en sensores de IR de estado sólido, los cuales no requieren enfriamiento. Ω



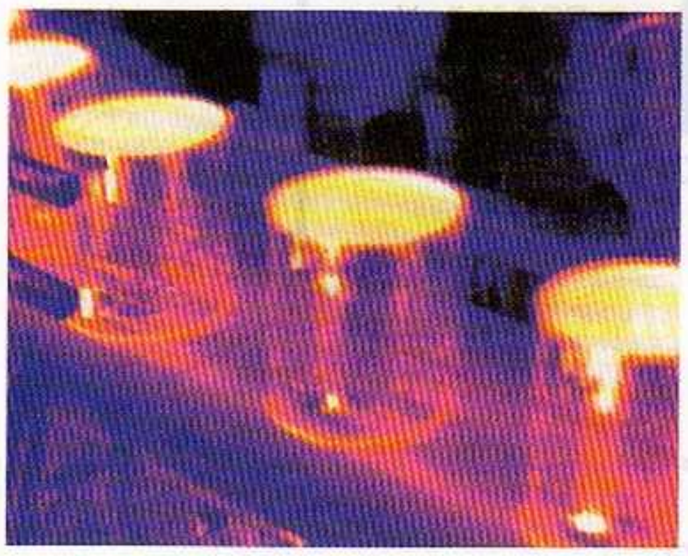
(a) Bobina de barras de acero todavía calientes, listas para ser cortadas. Las áreas de traslapo revelan que el enfriamiento no es uniforme, lo cual afecta la resistencia a la tensión del producto final.



(b) Rollo de papel listo para ser cortado en pliegos, hojas, etc. La imagen revela falta de uniformidad en los niveles de humedad, lo cual causa arrugas en el producto final.



(c) Bulbos de iluminación recién fabricados. La imagen revela que los filamentos están íntegros y el enfriamiento de las ampollas de vidrio es uniforme.



(d) Latas de alimentos sobre una banda transportadora. La imagen revela que las latas están perfectamente selladas y no presentan defectos.

Figura 11.20 *Ejemplos de imágenes térmicas obtenidas con sistemas de visión infrarroja*

Capítulo 12

Sensores ultrasónicos

Los sensores ultrasónicos son ampliamente utilizados en la industria para detectar proximidad y medir distancia, posición, caudal, nivel, flujo y otras variables físicas. En este capítulo se examinan a grandes rasgos su funcionamiento, construcción y aplicaciones. También se realiza una introducción a los sistemas de inspección acústica, utilizados para encontrar defectos internos ocultos, indetectables mediante otras técnicas.

Generalidades

Los sensores **ultrasónicos, figura 12.1,** son dispositivos basados en la emisión y recepción de **ultrasonidos**, es decir, ondas mecánicas por encima de 20 kHz, típicamente en el rango de 40 a 250 kHz. Los ultrasonidos, al incidir sobre un objeto, pueden ser parcial o totalmente reflejados, transmitidos o absorbidos por el mismo, así como sufrir cambios en su frecuencia, velocidad o tiempo de tránsito. Todas estas propiedades permiten aplicarlos con éxito en la detección y medición de proximidad, posición, distancia, nivel, flujo, caudal, y otras variables físicas, así como la implantación de los llamados **sistemas de inspección acústica**, utilizados para encontrar defectos internos ocultos en partes pequeñas.

Los ultrasonidos tienen un alto poder de penetración. Por esta razón, la mayor parte de las mediciones realizadas con sensores ultrasónicos son **no invasivas,** es decir los mismos no entran físicamente en contacto con el medio donde se producen los cambios que se desean detectar. Las mediciones no invasivas son de particular interés en ambientes explosivos, radiactivos o con otro

Figura 12.1 Los sensores ultrasónicos, como el mostrado en la fotografía, fabricado por Electro Corporation (www.electrocorp.com), son ampliamente utilizados en la industria para detectar objetos transparentes y opacos, así como para realizar mediciones no invasivas de nivel, flujo, caudal, distancia, y otras magnitudes físicas.

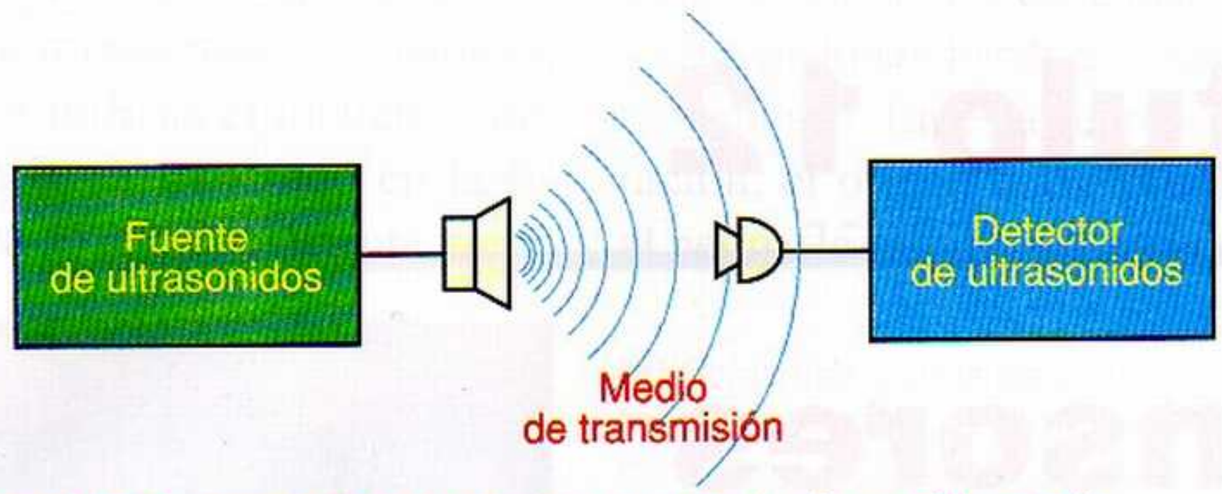


Figura 12.2 Diagrama de bloques generalizado, de un sistema de transmision y recepción de ultrasonidos

tipo de riesgos, así como en atmósferas que deben permanecer limpias y libres de contaminantes. Además, los sensores no invasivos son, en general, más fáciles de instalar y mantener que los invasivos.

Construcción y funcionamiento

Los sensores ultrasónicos operan, por lo general, utilizando las ondas de sonido reflejadas o no absorbidas por el objetivo, es decir el cuerpo o medio cuyas características se desean detectar. Constan, desde el punto de vista funcional, de una fuente de sonido gatillable, un transductor de transmisión, un transductor de recepción y un detector de sonido, **figura 12.2**.

Los circuitos de transmisión y recepción, con sus respectivos transductores, pueden ser dos módulos separados o estar incorporados en la misma unidad. En este último caso, es muy común que el mismo transductor empleado como transmisor (parlante) sea también utilizado como receptor (micrófono).

El transmisor produce una ráfaga de sonido ultrasónico, típicamente en el rango de 40 a 250kHz, la cual se enfoca en dirección del objetivo y se refleja hacia el receptor. Para determinar la distancia entre el sensor y el objetivo, el sistema simplemente mide el tiempo transcurrido desde que el transmisor envía el pulso hasta que el receptor capta el eco y lo relaciona con la velocidad del sonido a través del medio de transmisión. Esta depende de la temperatura y la composición del medio. Por ejemplo, en el aire es del orden de 331.3 m/s, en el cloro de 205.4 m/s y en el hidrógeno de 1269.5 m/s. En todos estos casos se asume una temperatura de 10ºC.

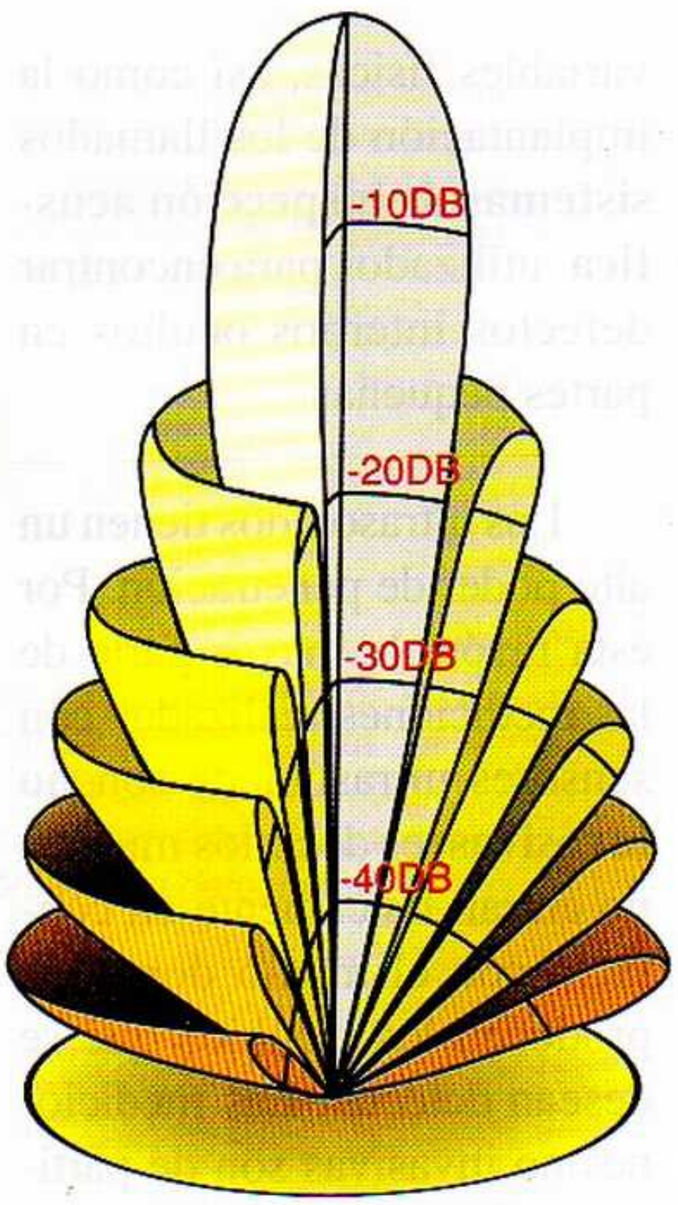


Figura 12.3 Patrón de radiación típico de un transductor ultrasónico

Los transductores ultrasónicos pueden ser diseñados para radiar sonido en muchos tipos diferentes de patrones, desde haces omnidireccionales, que se propagan en todas las direcciones, hasta haces unidireccionales, que lo hacen en una sola dirección. Para la mayoría de aplicaciones, lo deseable es tener un haz relativamente estrecho para evitar reflexiones indeseables. En la **figura 12.3** se muestra la representación tridimensional de un patrón de este tipo. Observe que el haz es estrecho y cónico, y posee múltiples lóbulos secundarios, cada uno de los cuales es secuencialmente de menor amplitud que el lóbulo previo. Este patrón es válido tanto para transmisión como para recepción.

Las aplicaciones de los ultrasonidos a la medida de magnitudes físicas están relacionadas principalmente con la medición de su velocidad o su tiempo de propagación, y la detección de la atenuación o interrupción del haz propagado. También se dispone de sensores ultrasónicos basados en el llamado **efecto Doppler**, descubierto por Christian Doppler en 1843.

El efecto Doppler explica el cambio que experimenta la frecuencia de una radiación cualquiera; en este caso un ultrasonido, cuando se refleja en un objeto reflector que se mueve respecto a la fuente de la radiación. Este cambio de frecuencia se puede evaluar mediante la siguiente fórmula:

$$fs - fr = 2fs\left(\frac{v}{c}\right)\cos\alpha$$

En esta expresión, ***fs*** es la frecuencia del sonido emitido por la fuente, ***fr*** la frecuencia del sonido recibido, ***v*** la velocidad del objeto reflector, ***c*** la velocidad del sonido en el medio de propagación y α el ángulo entre v y c. Una aplicación típica de esta teoría son los caudalímetros ultrasónicos, **figura 12.4**. La teoría de este tipo de transductores se examina en el **capítulo 7**.

En las aplicaciones basadas en la medición del tiempo de propagación, se mide el tiempo que tarda en recibirse el eco debido a la presencia de un objeto en el camino de propagación. El objeto puede ser un material líquido, sólido, granular, pulverizado, etc.

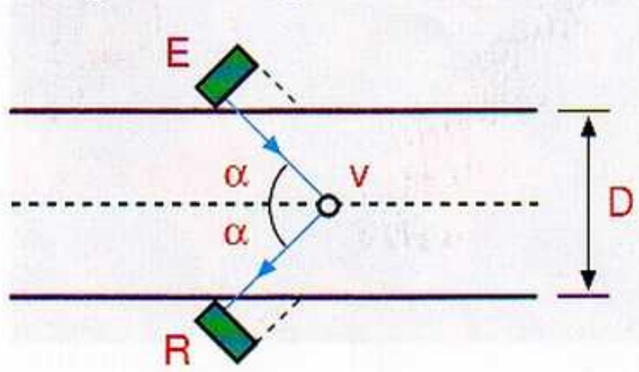
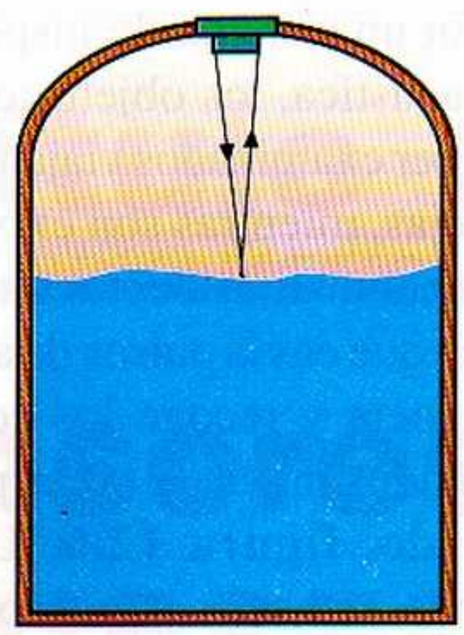
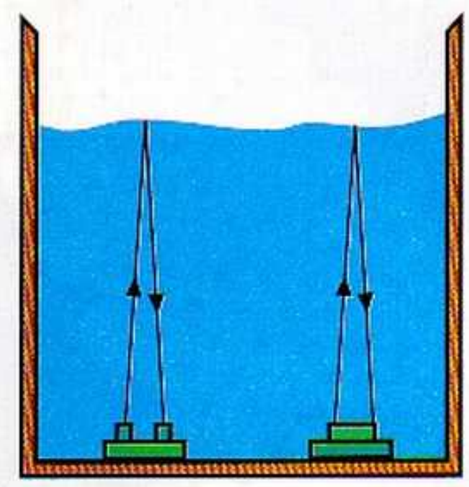


Figura 12.4 *Principio de un caudalímetro ultrasónico basado en el efecto Doppler*



Transductor no sumergido



Transductor sumergido

Figura 12.5 *Medición de nivel por ultrasonidos*

Lo importante es que la impedancia acústica de este último, es decir el producto de su densidad por la velocidad de propagación del sonido a través suyo, sea muy diferente a la del medio de propagación para que así la mayor parte de la radiación se refleje en la interfaz.

El método anterior se emplea, por ejemplo, para medir el nivel de líquidos y granos en depósitos, **figura 12.5**. El conjunto emisor-receptor puede estar dispuesto tanto en la parte superior como en la parte inferior del depósito. En ambos casos, el tiempo que tarda en recibirse el eco después de emitido el pulso ultrasónico, está directamente relacionado con el nivel.

Los ultrasonidos pueden ser también utilizados para detectar proximidad y medir variables físicas como el espesor, la temperatura, la densidad de gases y líquidos, la porosidad, la presión, la viscosidad, la elasticidad, etc. Mediante ultrasonidos se pueden igualmente medir vibraciones, detectar grietas en materiales estructurales, efectuar tareas críticas y precisas de limpieza, etc. También constituyen el principio de operación de los microscopios y los sistemas de inspección acústica.

Sistemas de inspección acústica

Los sistemas de inspección acústica o AMI (*acoustic micro-imaging*) son equipos de control de calidad, basados en ultrasonidos, que se utilizan para detectar defectos internos ocultos, tales como grietas y fisuras, presentes en partes y estructuras relativamente pequeñas. Muchos de estos defectos son generalmente indetectables mediante rayos X y escapan a los procesos de detección estándar.

Uno de los sectores productivos donde la presencia de defectos internos ocultos es particularmente significativa

Figura 12.6 Piezas cerámicas colocadas en bandejas, apiladas y listas para ser sometidas a un proceso automatizado de inspección acústica. Las bandejas no necesitan compartimientos: el único requisito para ser exploradas por ultrasonidos es que todas las partes estén en el mismo plano horizontal

es en la fabricación de dispositivos microelectrónicos, principalmente circuitos integrados. En estas piezas, cualquier grieta o desunión es un defecto latente que puede no causar cambios inmediatos en el desempeño del dispositivo, pero si causar su falla más adelante, cuando la misma rompa los diminutos alambres de conexión, abra puntos de soldadura o interrumpa un camino eléctrico de alguna otra forma.

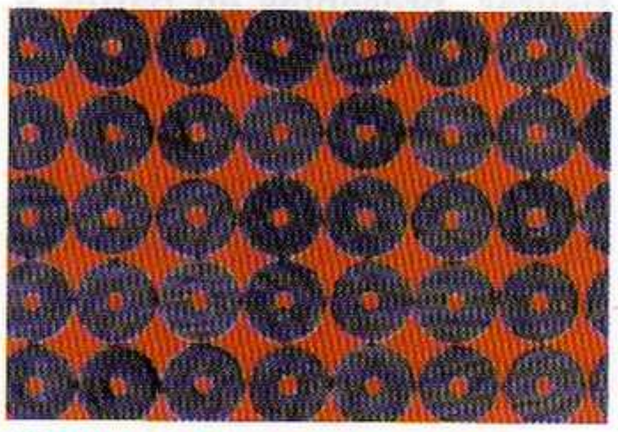


Figura 12.7 Imagen acústica obtenida de la exploración automática de una bandeja de partes cerámicas. La misma indica que la mayoría no tiene defectos internos.

En un sistema de inspección acústica, los objetos que van a ser examinados viajan en bandejas, mientras son explorados por un transductor ultrasónico que envía pulsos de alta frecuencia y recoge los ecos retornados miles de veces por segundo, **figura 12.6**. Los mismos se basan en el comportamiento de los ultrasonidos dentro de cada objetivo. A medida que un pulso de ultrasonido viaja del transmisor hacia el objetivo, pueden ocurrir tres efectos diferentes:

1. La señal viaja a través de una capa homogénea de material, es decir sin defectos. En este caso, no se retorna eco alguno al transductor. Así, una pieza cerámica de una sola capa, libre de defectos, producirá una imagen acústica que muestra únicamente la silueta del objeto, **figura 12.7**. El interior de la imagen se observará vacío.
2. La señal ultrasónica alcanza la zona de interfaz entre dos materiales, donde cambia el valor de la impedancia acústica. Como resultado, parte de la señal es reflejada hacia el transductor por la interfaz. El ultrasonido reflejado proporciona información acerca de la intensidad de la reflexión y su polaridad, es decir indica si el valor de la impedancia acústica aumenta o disminuye al cruzar la interfaz.
2. El ultrasonido alcanza un defecto, digamos una grieta, una desunión o un agujero. Debido a que estos defectos internos ocultos contienen aire (o, posiblemente, otro gas), la mayor parte de la señal ultrasónica se refleja hacia el transductor. Esta situación puede ser fácilmente detectada y utilizada para visualizar los defectos internos ocultos, **figura 12.8**.

Durante el proceso de exploración, el transductor ultrasónico debe ser acústicamente acoplado a las partes en la bandeja mediante la irrigación de agua u otro fluido. Esto se debe a que las señales ultrasónicas de baja frecuencia no viajan bien a través del aire. Una vez que la bandeja se ha alejado del transductor, el agua residual se retira mediante un chorro de aire. Para la mayoria de situaciones, la profundidad a la cual debe penetrar la onda ultrasónica es un parámetro conocido, ya sea porque corresponde a una interfaz particular o simplemente porque es la distancia a la cual es más probable que ocurra un defecto. Ω

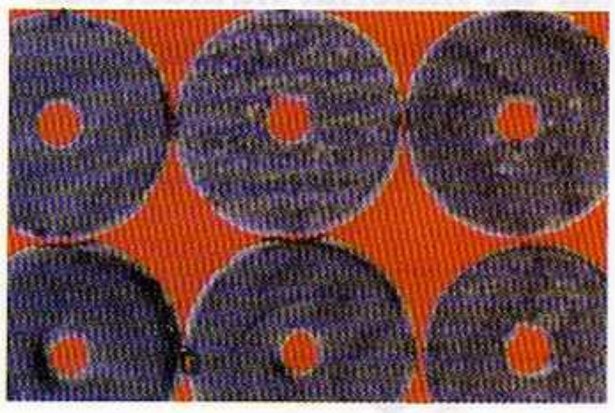


Figura 12.8 Vista magnificada de una imagen acústica. Las áreas oscuras en la parte inferior izquierda son agujeros internos.

Capítulo 13

Sensores de gases

En muchas aplicaciones industriales es necesario conocer la concentración y/o existencia de ciertos gases, humos y emisiones con el propósito de evaluar procesos o prevenir explosiones. En estas y otras situaciones juegan un papel importante los modernos detectores de gases. Este capítulo examina sus principios de funcionamiento, sus especificaciones y sus principales aplicaciones

Generalidades

Los gases son un tipo de fluido muy común en aplicaciones industriales y no industriales. En la industria, por ejemplo, es importante determinar la concentración de gases tales como oxígeno (O2), dióxido de carbono (CO2), hidrógeno (H2), metano (CH4), gas carbónico (CO), y otros gases y vapores orgánicos para analizar humos de salida de calderas de vapor, comprobar procesos de combustión, prevenir eventuales explosiones, etc. Para satisfacer estas y otras necesidades, se han desarrollado varias tecnologías de **sensores de gases**,

Figura 13.1 Los modernos sensores y detectores de gases desempeñan un papel importante en la industria moderna, permitiendo determinar concentraciones de sustancias específicas, comprobar procesos de combustión, prevenir explosiones, etc.

figura 13.1, la mayoría basadas en las propiedades de ciertos materiales de variar sus características eléctricas cuando se exponen a gases específicos. Las siguientes son algunas de las tecnologías más comunes que examinaremos en este capítulo:

- Sensores resistivos de óxido semiconductor
- Sensores de efecto de campo
- Sensores de onda acústica superficial (SAW)
- Sensores de absorción infrarroja
- Sensores de fibra óptica

Gran parte del esfuerzo en el desarrollo de tecnologías de detección de gases se debe al interés en monitorear el oxígeno en los vapores de escape de los motores de combustión interna. También hay sensores para otros gases, los cuales se aplican a la detección de fugas, el monitoreo de procesos de fermentación, el control del funcionamiento de sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC), la detección de humo, alarmas contra incendios y pruebas de alcoholemia.

Adicionalmente, algunas tecnologías de detección de gases, principalmente las basadas en el uso de óxidos metálicos semiconductores, son también aplicables a la realización de **sensores de olor**, más exactamente de las moléculas asociadas a la percepción olfativa. La detección y/o medición de olores es importante en la prevención de explosiones o envenenamientos, el control de calidad de perfumes y fragancias, el control ambiental, y otras aplicaciones similares.

Sensores de gas resistivos

Los sensores de gas resistivos se basan en la variación de la conductividad, volumétrica o superficial, de algunos óxidos semiconductores en función de la concentración de oxígeno del medio ambiente en que se encuentran. Esta propiedad es típica de sustancias como el TiO_2, el ZrO_2, el ZnO, el Fe_2O_3, el WO_3, el $MgCr_2O_4$, el Co_3O_4 y, principalmente, el SnO_2 (óxido de estaño). En estos materiales, hay un déficit de átomos de oxígeno en su estructura cristalina, lo cual ocasiona que, al aumentar la temperatura y absorber oxígeno, se neutralice el exceso de átomos metálicos y se reduzca la conductividad.

En general, los óxidos basados en la variación de la conductividad superficial, como el SnO_2, responden más rápidamente a los cambios de concentración y trabajan a más bajas temperaturas que los basados en la variación de la conductividad volumétrica, como el TiO_2. Además, son más económicos, compactos y fáciles de fabricar. Por estas y otras razones, son los más utilizados en los sensores de oxígeno comerciales. También posibilitan la detección de otros gases, siempre y cuando dichos gases reaccionen con el oxígeno. Este último puede ser adsorbido, por ejemplo, exponiendo previamente el sensor al aire.

En la **figura 13.2** se muestra como ejemplo la estructura interna típica de un sensor de gas basado en óxido de estaño sinterizado. Este último debe calentarse a una temperatura específica, digamos 400°C, dependiendo del tipo de gas, para precipitar la adsorción o absorción de oxígeno y favorecer la reacción entre el oxígeno de la superficie y los gases.

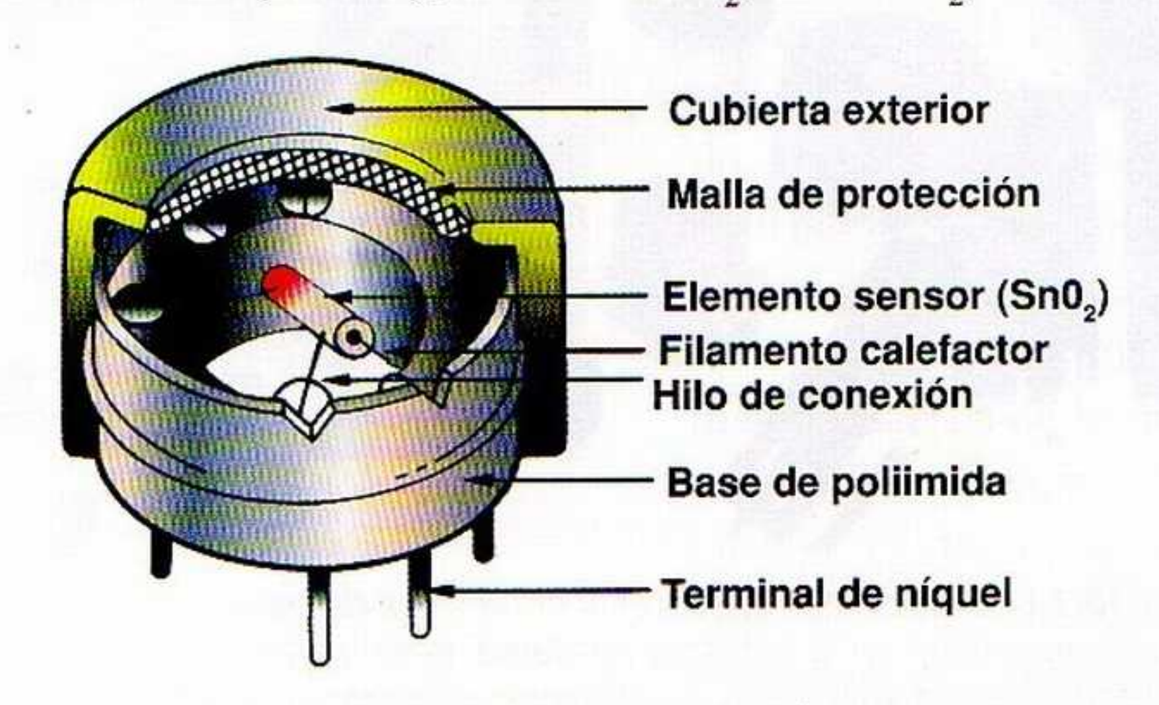


Figura 13.2 Estructura típica de un sensor de gas de SnO2

A veces, en lugar de sinterizarse, formando pequeñas bolitas, el SnO_2 se prepara en películas delgadas o gruesas sobre un soporte cerámico. La temperatura de funcionamiento requerida se obtiene, generalmente, haciendo circular una pequeña corriente eléctrica a través de un filamento de platino. Este último puede estar instalado dentro o alrededor del elemento sensor, o encontrarse impreso en el dorso de la cerámica. De cualquier modo, la resistencia del material cambia rápidamente de acuerdo a los cambios en la concentración del gas.

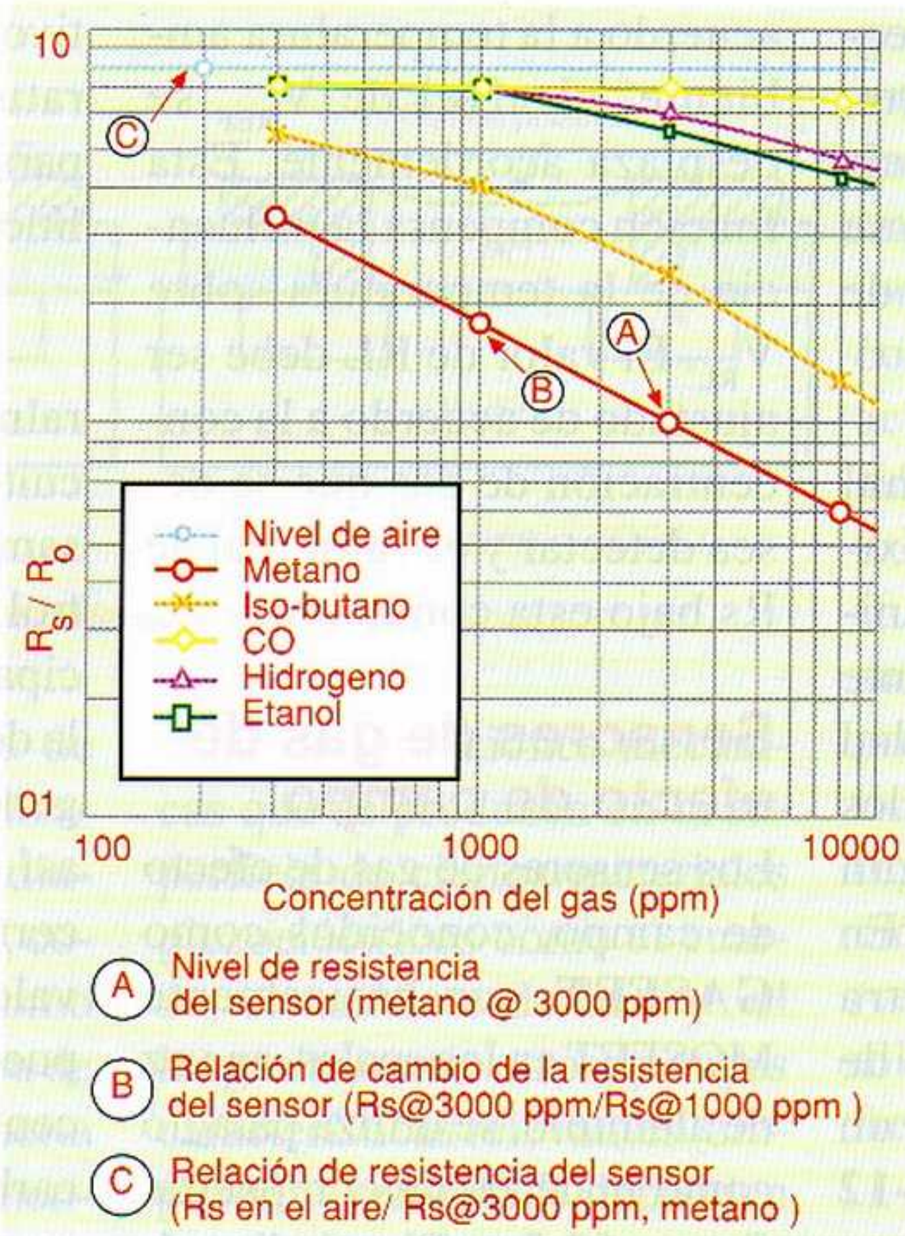


Figura 13.3 Curva característica de sensibilidad de un sensor de gas FIS SP-12A

Específicamente, las reacciones entre el oxígeno superficial y el gas incidente, provocan un cambio dinámico del potencial eléctrico en el cristal de SnO_2, originando la disminución de la resistencia del sensor bajo la presencia de gases reductores tales como monóxido de carbono (CO), metano, hidrógeno, etc.

El óxido de estaño tambien puede utilizase como sensor de olor mediante la adición de óxido de calcio (CaO). Un sensor de este tipo consiste básicamente en una pasta de SnO_2 dispuesta alrededor de un filamento de platino, y con CaO añadido. Nuevamente, para mantener el sensor a la temperatura de trabajo requerida, típicamente 400ºC, se hace circular una corriente eléctrica por el hilo de platino. Incorporada a un puente de Wheatstone, la variación en la resistencia del sensor produce una variación ΔV en la tensión de salida que está relacionada con la concentración de la sustancia (X) y la intensidad del olor (Y) de la misma según las ecuaciones empíricas:

$$\Delta V = K_1 X^n$$
$$Y = K_2 X^m$$

siendo **ΔV=Vg-Va**, donde **Vg** representa la tensión de salida en presencia de la sustancia mezclada con el aire, y **Va** la tensión de salida en presencia de aire puro. Los demás términos (**K1**, **K2**, **n** y **m**) son constantes que dependen de cada sustancia en particular.

Los sensores de gas de óxido metálico semiconductor se caracterizan mediante varios parámetros, siendo los más importantes la resistencia absoluta (**Rs**), la resistencia relativa (**R/Ro**) y la sensibilidad o relación de cambio de la resistencia (**S/N**). Todos ellos están relacionados con la forma como cambia la resistencia del sensor en función de la concentración del gas bajo condiciones específicas de temperatura y humedad.

En la **figura 13.3**, por ejemplo, se muestra la curva característica de Rs/Ro de un sensor **SP-12A** de **FIS** para varios tipos de gases. En todos los casos, se toma como referencia (Ro) la resistencia del sensor para una concentración de metano de 3 000 ppm (punto A).

Para el SP-12A, esta última es del orden de 3 a 12kΩ, digamos 10kΩ. De este modo, el valor de Rs sería de 18kΩ para una concentración de metano de 1 000 ppm (punto B) y de 80kΩ en condiciones de aire puro (punto C). Asimismo, la relación de cambio de

la resistencia en A con respecto a B sería, simplemente, 10kΩ/18kΩ=0.55, es decir del 55%. Del mismo modo se analizan los demás puntos de la gráfica.

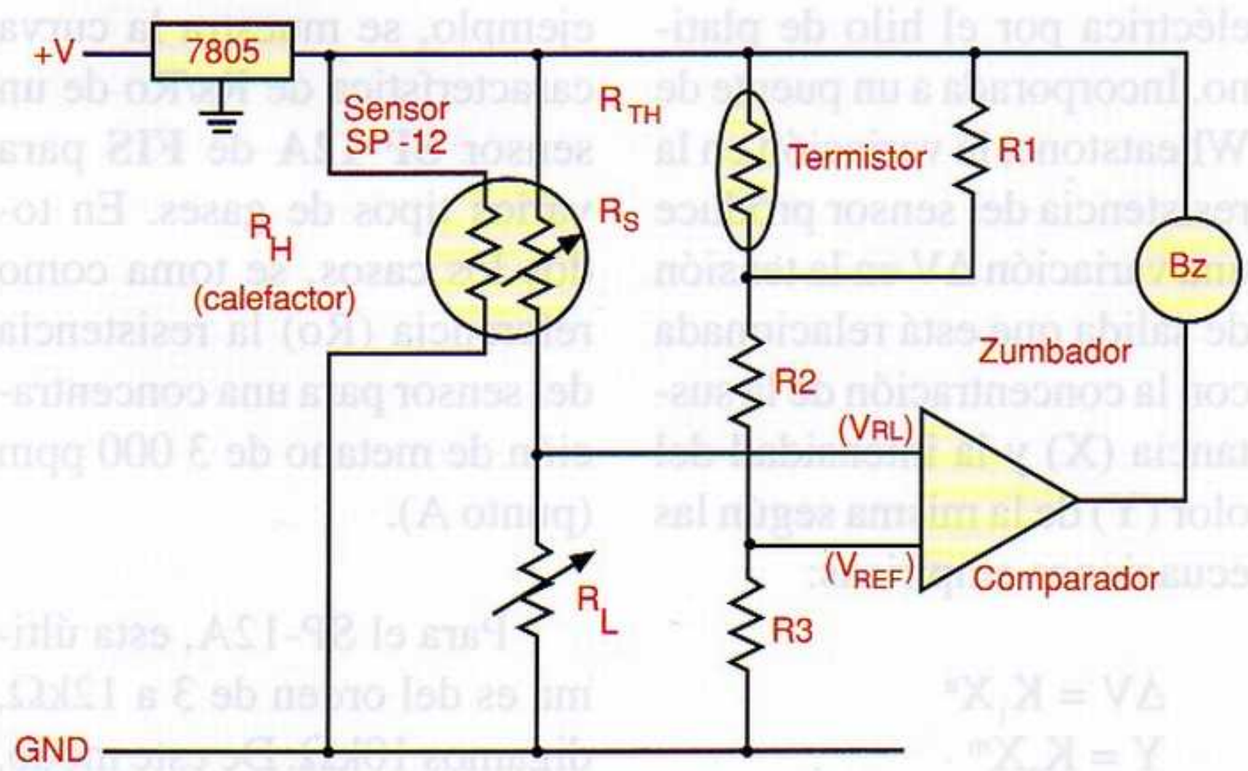
La resistencia nominal de los sensores de gas de óxido metálico varía de una unidad a otra y está fuertemente influenciada por la humedad relativa. Por esta razón, ellos deben proveerse de algún medio de compensación. En la **figura 13.4** se muestra como ejemplo un circuito de detección de gases con un sensor FIS **SP-11** o **SP-12** que utiliza un termistor (RTH) como compensador de temperatura. En este caso, el zumbador (Bz) se activa cuando V_{RL} excede a V_{REF}. Debido a que la resistencia del termistor cambia de acuerdo a la temperatura ambiente, el nivel de V_{REF} se desplaza acordemente. Esta función compensa la influencia de la temperatura sobre V_{RL}. El valor de RL debe ser ajustado de acuerdo a la concentración de gas que se desea detectar y el valor real de Rs bajo esta condición.

Sensores de gas de efecto de campo

Los sensores de gas de efecto de campo, conocidos como **GASFET**, son básicamente MOSFET en los cuales, en vez de aluminio, se utiliza paladio como material de compuerta, **figura 13.5a**. El paladio adsorbe hidrógeno que se difunde en la interfaz paladio-óxido, alterando la tensión de umbral (V_{TH}). Esta última es una medida de la concentración de hidrógeno. El dispositivo se hace trabajar a temperaturas entre 50°C y 150°C para favorecer la acción catalítica del paladio.

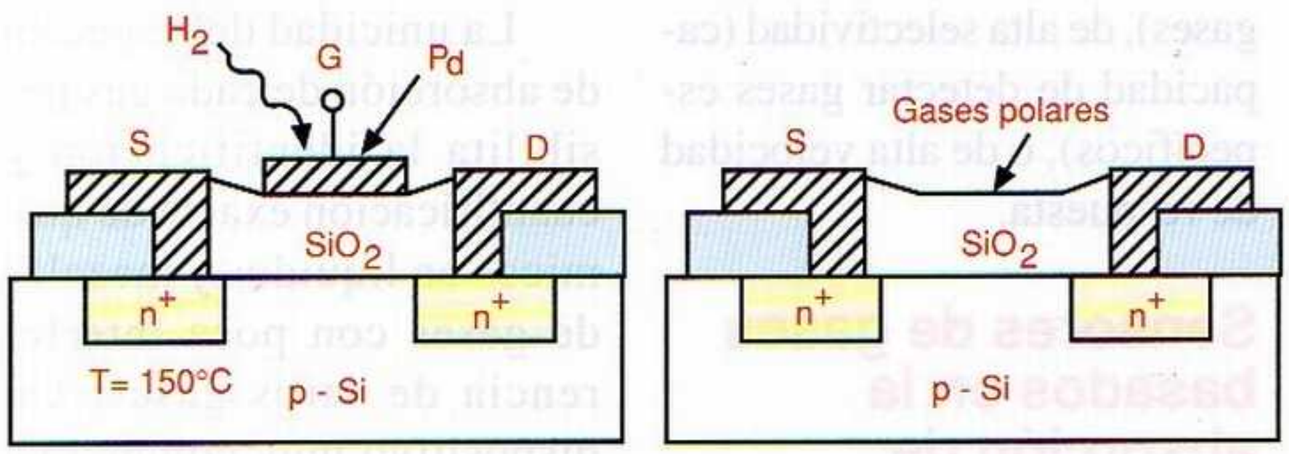
Los GASFET están generalmente integrados con circuitos electrónicos de procesamiento de señales y de control de temperatura. Sus principales aplicaciones incluyen la detección de fugas de hidrógeno en cohetes y refinerías, así como el monitoreo de la corrosión en equipos de alto valor. Por el mismo método pueden también medirse concentraciones de monóxido de carbono (CO), metano (CH_4) y amoníaco (NH_3).

Otra variante de sensor de gas MOSFET es el FET de adsorción o **ADFET**, **figura 13.5b**, en el cual el óxido tiene un grosor inferior a 5 nm. Este dispositivo responde a concentraciones de gases que tienen un momento dipolar permanente, como el NH_3, el ClH, el CO, el NO, el NO_2, el SO_2 y el vapor de agua. En todos estos casos, el campo eléctrico creado por las moléculas adsorbidas en la capa de óxido, controla la corriente de drenador. Una variante más es el FET de compuerta abierta u **OGFET**, que es básicamente un MOSFET sin puerta expuesto a una atmósfera gaseosa. En este caso, la corriente de drenador varía en función de la presión parcial de los gases incidentes.



	Gas detectado	R1	R2	R3	Termistor
SP -11	Iso-Butano	47 kΩ	6.2 kΩ	16 kΩ	
	Metano	30 kΩ	11 kΩ	20 kΩ	
SP - 12	Metano	30 kΩ	11 kΩ	20 kΩ	R25: 10 kΩ

Figura 13.4 Circuito de detección de gases con función de compensación de temperatura incluida



(a) FET de gas o GASFET. (b) FET de adsorción o ADFET.

Figura 13.5 Estructuras comunes de sensores de gases basados en MOSFET

También se dispone de sensores tipo FET especializados en la detección de **radiaciones**. Estos dispositivos, conocidos genéricamente como **RadFET**, utilizan una capa de óxido/nitruro en la compuerta para atrapar permanentemente los huecos generados por radiaciones ionizantes.

Lo anterior provoca un desplazamiento en el umbral de voltaje, el cual es un indicativo de la dosis total de radiación recibida. Mediante arreglos de RadFET y filtros metálicos se pueden construir espectrómetros de radiación para diferentes niveles de energía. Las principales aplicaciones de los RadFET incluyen el monitoreo de materiales nucleares especiales y la dosificación de radiaciones para terapias del cáncer.

Sensores de gas basados en ondas acústicas superficiales (SAW)

Las ondas acústicas superficiales o SAW (*Surface Acoustic Waves*) son un tipo particular de vibraciones mecánicas que se producen en la superficie de ciertos materiales piezoeléctricos como el cuarzo, el tantalato de litio y el langasite, entre otros, y cuyas características relevantes (amplitud y velocidad) dependen del estado de deformaciones en la superficie. Estas deformaciones pueden ser provocadas por los cambios de temperatura, así como por diversos factores físicos y químicos. Aprovechando esta propiedad, se han desarrollado varios tipos de dispositivos SAW especializados en la detección de gases.

En su forma más simple, un dispositivo SAW, **figura 13.6**, se compone de dos juegos de electrodos de aluminio interdigitados, depositados al vapor sobre la superficie de una película piezoeléctrica (sustrato). Esta última trabaja como una línea de transmisión acústica. Al aplicar una tensión alterna de alta frecuencia a los electrodos de entrada (fuente), el sustrato oscila en su frecuencia de resonancia, produciéndose sobre su superficie una onda acústica superficial. Al llegar esta perturbación a los electrodos de salida (receptor), se produce entre ellos una tensión alterna de frecuencia muy precisa.

En otras palabras, un dispositivo SAW convierte energía eléctrica en mecánica y luego la reconvierte a eléctrica. Dependiendo del diseño del sensor, la acción física que provoca la onda acústica superficial puede afectar el sustrato en su totalidad o sólo la superficie del mismo. Esta última esta generalmente recubierta con una película sensible que es la que experimenta los cambios. Así se pueden medir fácilmente humedad,

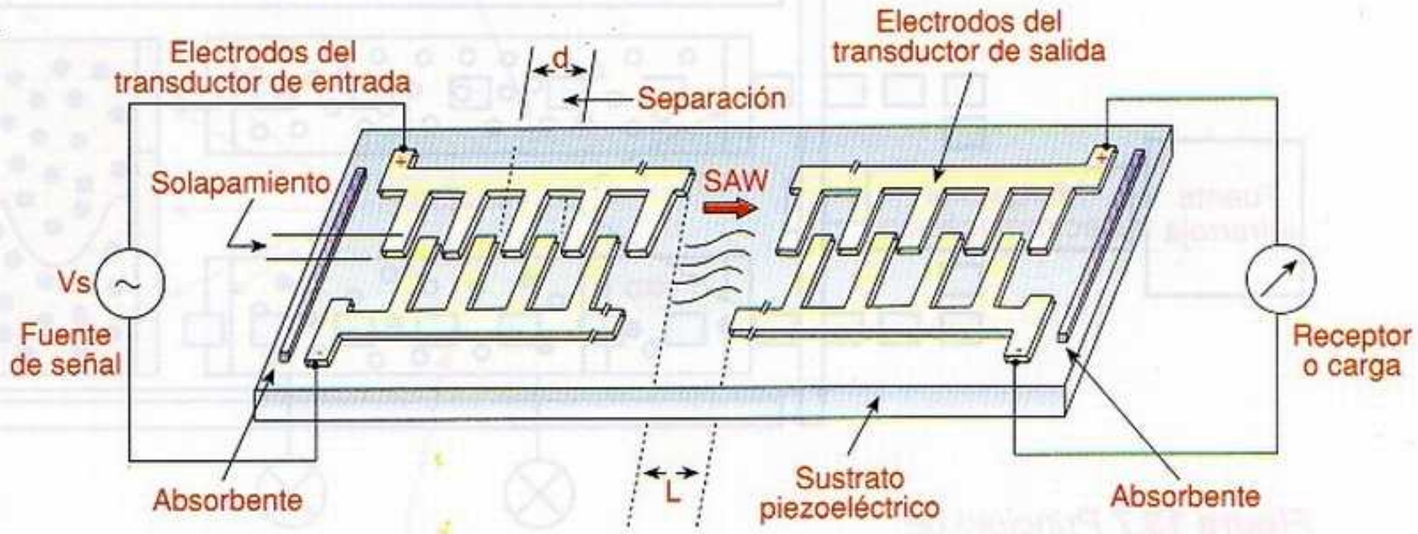


Figura 13.6 Estructura básica de un sensor de gas de onda acústica superficial (SAW)

masa, torque y otras variables físicas, así como detectar vapores, gases y sustancias químicas que penetran superficial o profundamente en el sustrato, o reaccionan de algún modo con el mismo.

En este caso, el contacto entre la película sensible y el ambiente que va a ser monitoreado, induce un estrés mecánico en la película piezoeléctrica, lo cual cambia algunas características de la onda que viaja hacia el receptor; por ejemplo, su frecuencia. Estos cambios se utilizan para medir indirectamente la magnitud de la variable ambiental monitoreada.

Mediante esta técnica se han desarrollado detectores de CO, ClH, H_2, SH_2, NH_3, NO_2, SO_2, hidrocarburos y otros gases. El recubrimiento se puede optimizar dependiendo de si lo que se desea obtener es un sensor de alta sensibilidad (capacidad de detectar pequeñas concentraciones de gases), de alta selectividad (capacidad de detectar gases específicos), o de alta velocidad de respuesta.

Sensores de gases basados en la absorción de infrarrojos

La absorción de infrarrojos (IR) es una de las técnicas de detección y medición de gases más confiables y exactas que existen. La misma se basa en el hecho de que algunos gases, tales como el oxígeno, el nitrógeno, el hidrógeno y el cloro, no absorben prácticamente radiaciones infrarrojas. Otros, sin embargo, como el dióxido y el monóxido de carbono, el metano, el amoníaco y el vapor de agua si lo hacen, y en cantidades detectables para longitudes de onda específicas. Lo mismo sucede con muchos químicos importantes utilizados para procesos industriales y el monitoreo de la calidad del aire en interiores, como los compuestos refrigerantes de clorofluorocarbono.

La unicidad del espectro de absorción de cada gas posibilita la identificación y cuantificación exacta de químicos en líquidos y mezclas de gases con poca interferencia de otros gases. Un dispositivo muy común que hace uso de esta característica es el analizador de infrarrojos mostrado en la **figura 13.7**, el cual consta de una cámara de referencia que se llena con un gas no absorbente, digamos nitrógeno (N_2), y una cámara de detección donde se coloca una muestra del gas absorbente a analizar, por ejemplo metano (CH_4).

En este caso, a cada cámara se aplica alternativamente una radiación IR de longitud de onda específica, de modo que la radiación que pasa a través de la primera no se atenúa, mientras que la de la otra es absorbida proporcionalmente a la concentración del gas bajo análisis.

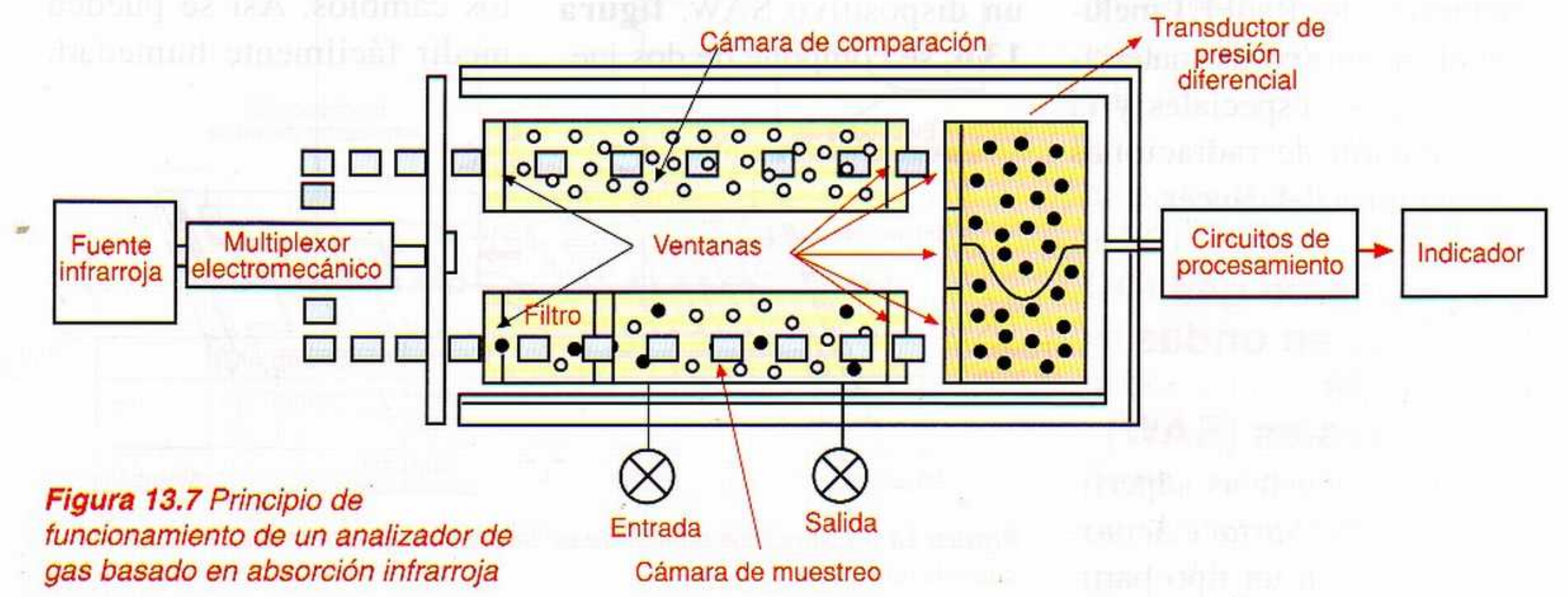


Figura 13.7 Principio de funcionamiento de un analizador de gas basado en absorción infrarroja

Esta concentración se determina indirectamente midiendo la diferencia de presión entre ambas cámaras. Para ello se utiliza normalmente como captador un micrófono de condensador, una de cuyas placas es precisamente la membrana metálica que divide las dos cámaras.

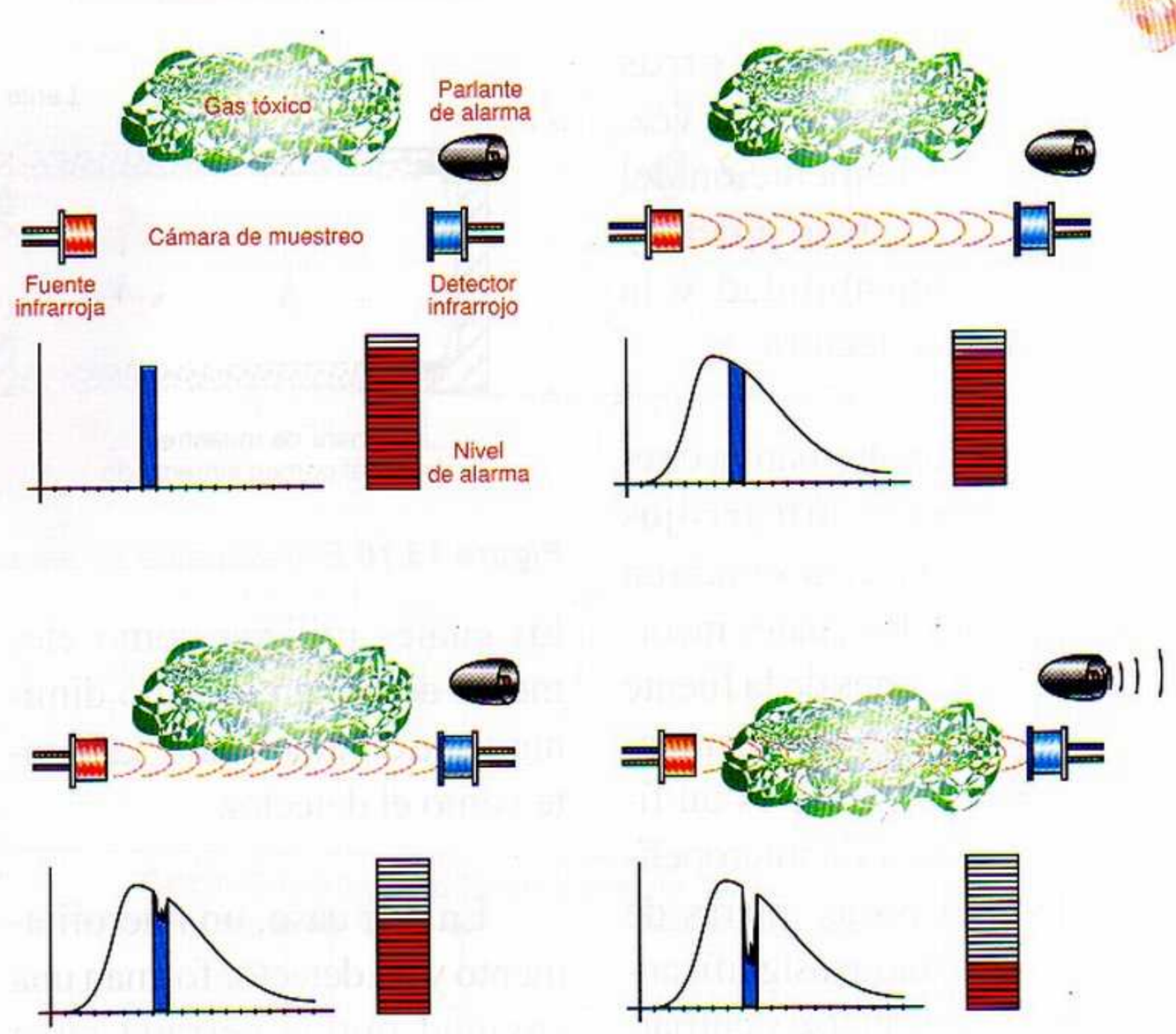


Figura 13.8 Operación básica de un sensor de gas infrarrojo no dispersivo (NDIR)

Los instrumentos anteriores son muy precisos, pero tienden a ser muy grandes, costosos y frágiles, lo cual no los hace muy atractivos para aplicaciones masivas, tales como el monitoreo de emisiones de monóxido de carbono en automóviles. Una variante son los **sensores infrarrojos no dispersivos** o NDIR (*Non-Dispersive Infrared*), **figura 13.8**, los cuales utilizan como fuente de luz un bulbo o luminaria incandescente que emite un haz infrarrojo a través de la muestra de gas. Un detector asociado, precedido de un filtro óptico, convierte la señal IR transmitida, a una señal eléctrica equivalente. El filtro se escoge de modo que permita al detector monitorear selectivamente sólo la parte del espectro infrarrojo que es específicamente afectada por el gas de interés.

Este tipo de sensores pueden detectar un amplio rango de vapores tóxicos e inertes y son muy utilizados en las industrias médica y automotriz, así como en sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC), de control de procesos y de control ambiental. Las electrónica asociada al detector puede estar diseñada para proporcionar una señal de salida proporcional a la concentración del gas de interés o indicar cuando el mismo alcanza un nivel muy alto o peligroso.

Debido a que los detectores IR comúnmente usados en los analizadores y sensores basados en absorción infrarroja son muy sensibles a los cambios en los niveles de iluminación, pero no a los niveles de iluminación absolutos, los mismos requieren típicamente una fuente de luz infrarroja modulada. Tradicionalmente, esta modulación ha sido llevada a cabo con *choppers* o troceadores mecánicos, los cuales constan de un motor impulsor, una rueda rotatoria que interrumpe periódicamente la línea de vista fuente-detector, y varios captadores electrónicos que sincronizan las señales del *chopper* y el detector.

Con el fin de reducir el costo, el tamaño, el consumo de potencia y la complejidad, muchas unidades de absorción IR reemplazan la fuente y el *chopper* con lámparas incandescentes especiales, e incluso lámparas de panel ordinarias. Aunque el uso de estas últimas tiende a ser muy común, las mismas no son una buena solución debido a que emiten luz en un espectro muy amplio y se desperdicia energía. Además, la luz por fuera de la banda de medición deseada calienta detectores,

preamplificadores y otros componentes. Esto, a su vez, interfiere con la medición del espectro del gas bajo prueba y degrada la sensibilidad y la exactitud de la lectura.

Una mejor alternativa es el uso de **emisores infrarrojos pulsables**, como el mostrado en la **figura 13.9**, los cuales incorporan las funciones de la fuente y el *chopper* en un solo elemento. Su elemento clave es un filamento radiador de micropelícula, de unas pocas micras de espesor, cuya masa insignificante le permite calentarse y enfriarse en milisegundos. Este tipo de sensores son actualmente muy utilizados en instrumentos comerciales para la detección de gases varios, el control de procesos industriales, el monitoreo de la calidad del aire en interiores, la prueba del escape en automóviles, y el monitoreo de gases para anestesia. Actualmente se dispone también de sensores de gas infrarrojos **micromecanizados, figura 13.10**, los cuales utilizan como elemento activo un módulo diminuto que contiene tanto la fuente como el detector.

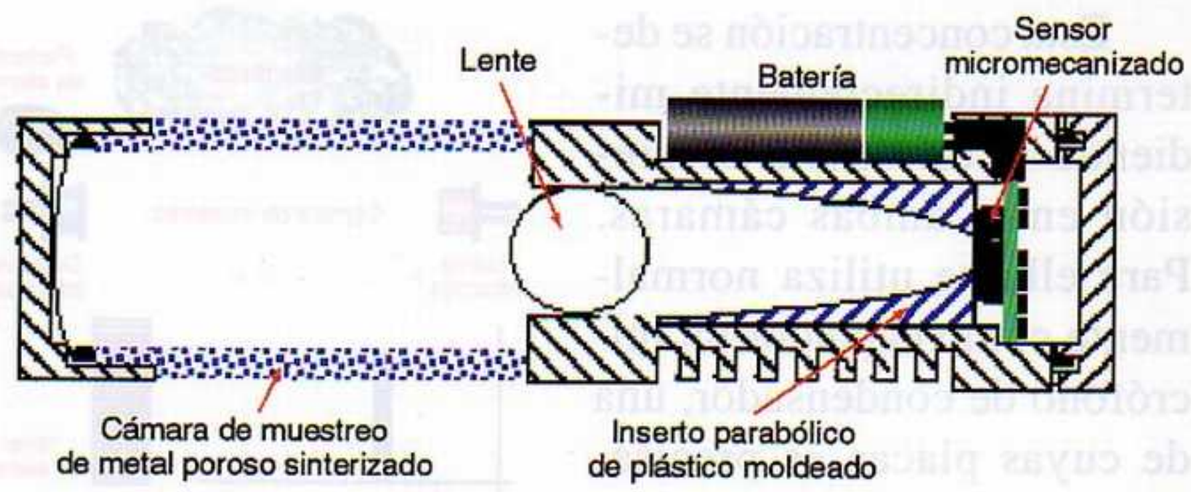


Figura 13.10 Estructura de un sensor de gas infrarrojo micromecanizado

En este caso, un microfilamento y un detector forman una cavidad óptica cerrada cuya temperatura cambia con la introducción del gas bajo prueba, el cual absorbe radiación IR dentro de la banda de emisión. Monitoreando los cambios de temperatura y comparándolos con los de una longitud de onda de referencia, se determina la concentración del gas.

En lugar de una fuente de luz incandescente, una excelente alternativa para medir concentraciones de gases por absorción IR es utilizando un **láser**, el cual proporciona una luz monocromática pura, con toda la energía concentrada en una sola longitud de onda. La luz láser se pasa a través de una muestra del gas y la potencia óptica a través de esta muestra se detecta como una función de la longitud de onda. Esto resulta en una medición muy precisa en una parte del espectro de absorción. La cantidad de potencia absorbida por el gas depende del producto del número de moléculas presentes, la sección transversal y la longitud del camino óptico de transmisión.

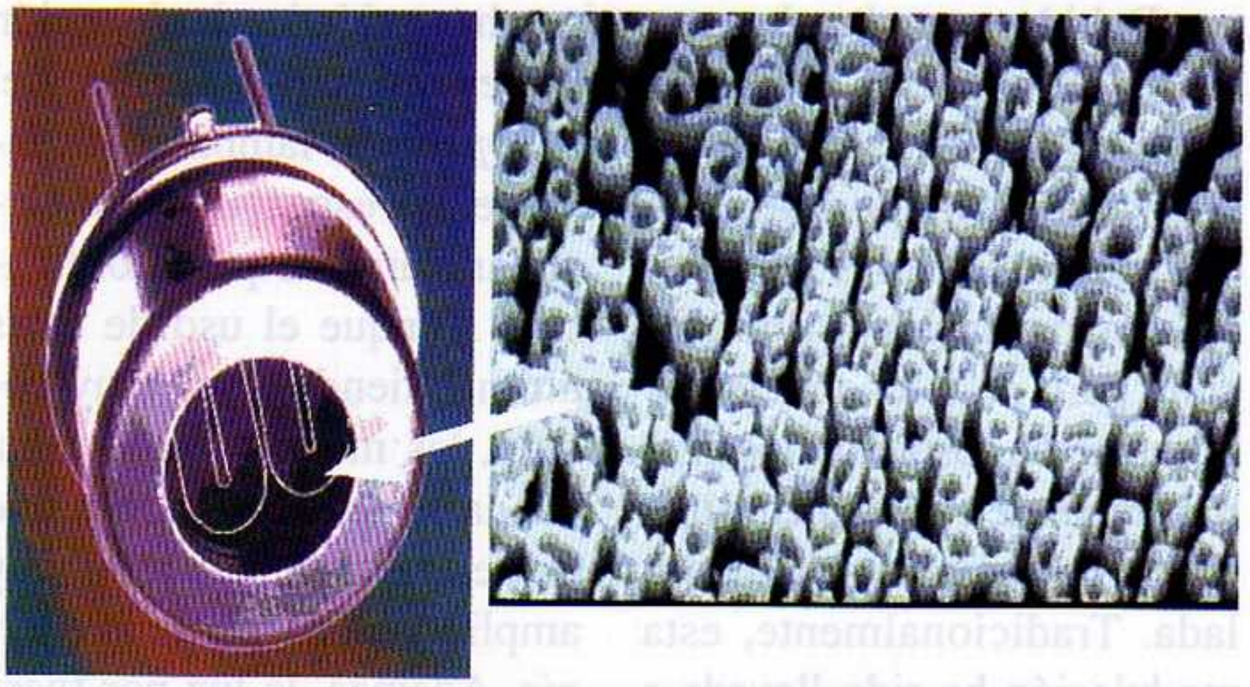


Figura 13.9 Emisor infrarrojo pulsable. Se muestra la textura del radiador o filamento de micropelícula vista a través de un microscopio electrónico. Su fabricante es ***Ion Optics*** *(http://www.ion-optics.com).*

Cabezales y sistemas de detección de gases

Los cabezales de detección (*detector heads*) son dispositivos inteligentes de adquisición de datos que integran, en una misma unidad, uno o más sensores de gas, una salida eléctrica y toda la infraestructura física (*hardware*) necesaria para el muestreo, tales como filtros, conductos, unidades de pirólisis y bombas de succión.

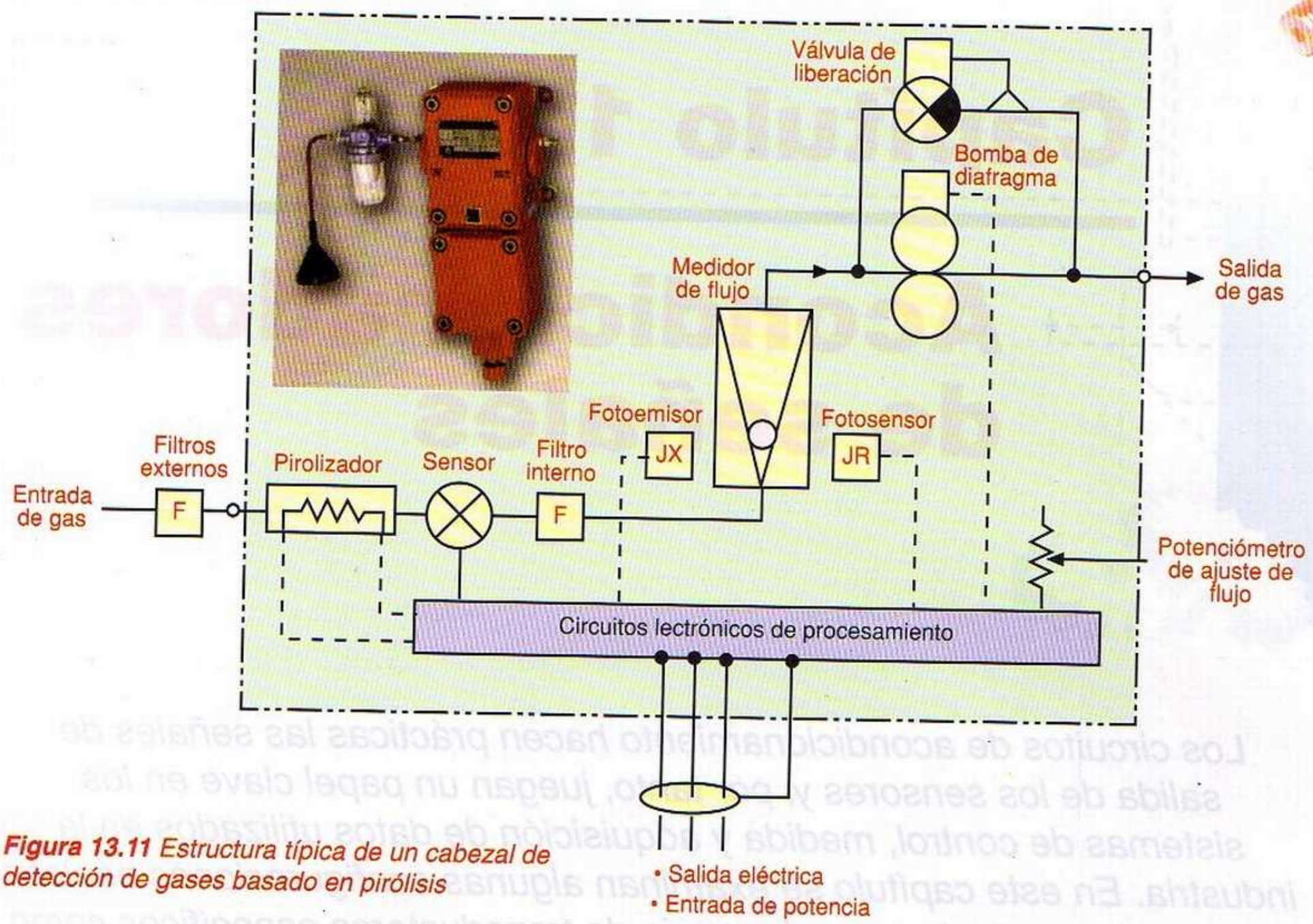


Figura 13.11 Estructura típica de un cabezal de detección de gases basado en pirólisis

En la **figura 13.11,** por ejemplo, se muestra el diagrama de bloques de un cabezal de detección moderno que utiliza **pirólisis** (descomposición química mediante calor) para oxidar el gas deseado y hacerlo más fácilmente detectable. Se requieren varios tipos de filtros para proteger el sensor, la bomba de muestreo, el medidor de flujo, etc., así como para bloquear gases interferentes. Las muestras de gas se recogen generalmente por succión o difusión y se dirigen hacia el detector a través de tubos de teflón. La recolección por succión es particularmente adecuada en situaciones de flujo de aire variable.

Los cabezales de detección de gases son muy utilizados en instrumentos portátiles y en sistemas de monitoreo fijos para detectar fugas y concentraciones riesgosas. Un sistema de detección de gases consta de varios cabezales fijos asociados a los puntos de interés, un centro de monitoreo y control, y una interfaz hacia otros sistemas y dispositivos de seguridad. Dependiendo de la forma como se lleven las muestras de gases hacia los detectores y se comuniquen estos últimos con el centro de monitoreo y control, existen varias arquitecturas o configuraciones, como la mostrada en la **figura 13.12**, la cual utiliza un sensor **centralizado** que explora secuencialmente las muestras de gas de los puntos bajo monitoreo. Estas muestras son conducidas al detector a través de una red de tubería. Otra alternativa es un sistema **distribuido**, el cual utiliza sensores dedicados para cada punto. Ω

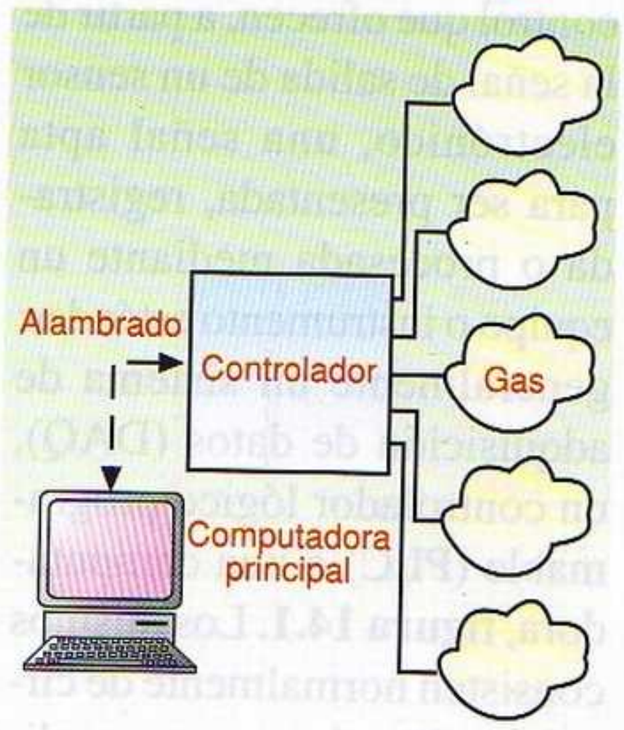


Figura 13.12 Arquitectura típica de un sistema industrial de detección de gases con sensor centralizado

Capítulo 14

Acondicionadores de señales

Los circuitos de acondicionamiento hacen prácticas las señales de salida de los sensores y, por tanto, juegan un papel clave en los sistemas de control, medida y adquisición de datos utilizados en la industria. En este capítulo se examinan algunas configuraciones básicas de los mismos, tanto para el manejo de transductores específicos como para la realización de funciones de propósito general.

Generalidades

Los **acondicionadores de señal**, en un sentido amplio, son los elementos de un sistema de control que ofrecen, a partir de la señal de salida de un sensor electrónico, una señal apta para ser presentada, registrada o procesada mediante un equipo o instrumento estándar; generalmente un sistema de adquisición de datos (DAQ), un controlador lógico programable (PLC) o una computadora, **figura 14.1.** Los mismos consisten normalmente de circuitos electrónicos que realizan funciones específicas y generales como compensación, amplificación, filtrado, adaptación de impedancias, modulación, demodulación, aislamiento, multiplexaje, etc.

La mayoría de sensores del mundo real generan señales que deben ser previamente acondicionadas para poderlas procesar de una manera exacta y confiable. Consideremos, por ejemplo, el caso de una termocupla, probablemente el transductor más popular para la medición de temperatura, **figura 14.2**. Como vimos en el **capítulo 8**, una termocupla opera bajo un principio según el cual dos metales disimiles generan un voltaje que varía con la temperatura. Sin embargo, la conexión de los hilos de una termocupla a los alambres que la conectan al dispositivo de medición crea una unión termoeléctrica adicional, la llamada **unión fría**. Por tanto, el voltaje real medido incluye, tanto el voltaje de la termocupla propiamente dicha como los voltajes de la unión fría. Esto implica que debe utilizarse algún medio de acondicionamiento para compensar estos voltajes indeseables. Dicha técnica se conoce precisamente como **compensación de unión fría**.

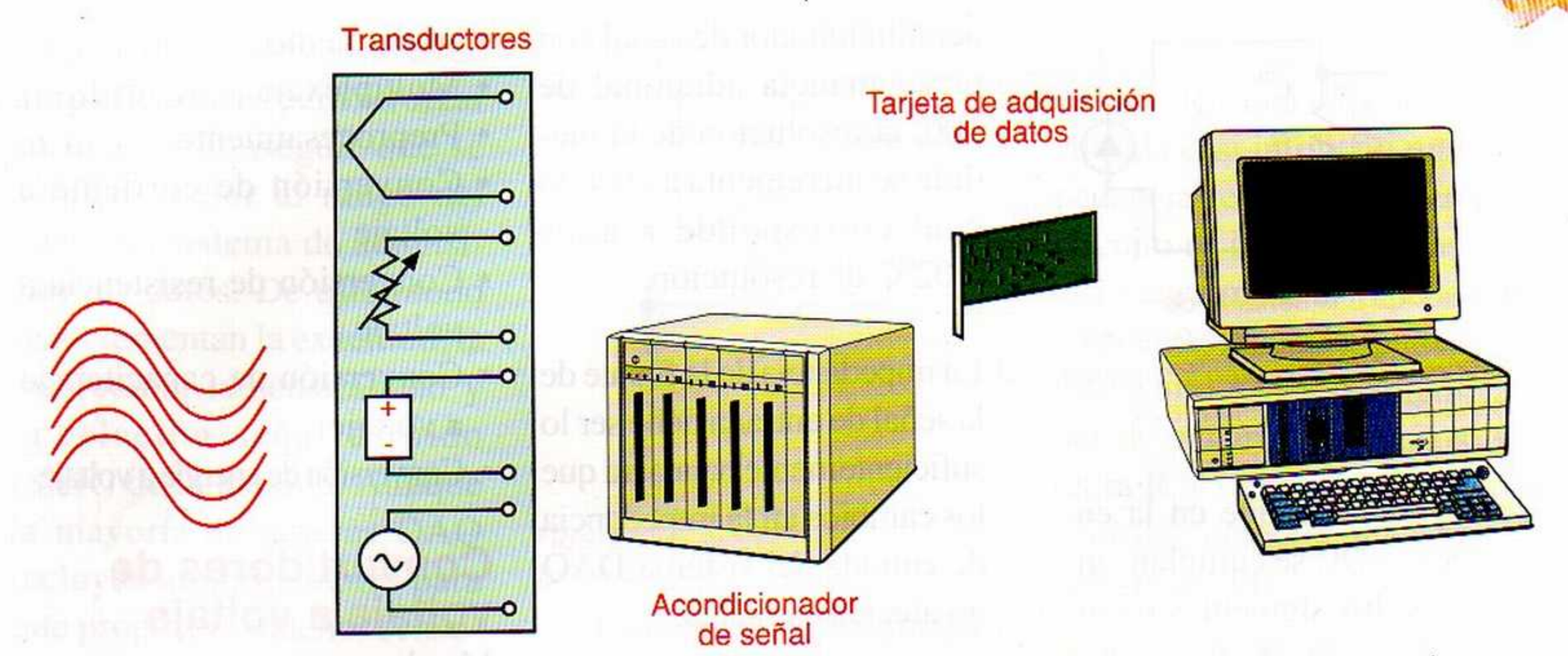


Figura 14.1 *Los acondicionadores de señales son una parte muy importante de la mayoria de sistemas de control y de adquisición de datos (DAQ). En la ilustración se aprecian los componentes claves de un sistema DAQ basado en PC.*

Otros factores de medición importantes relacionados con las termocuplas son la sensibilidad y el ruido. Los voltajes de salida de las termocuplas son de muy bajo nivel y cambian únicamente de 7 a 50 µV por cada 1°C de cambio en la temperatura, lo cual las hace muy susceptibles al ruido eléctrico. Esto implica que sus circuitos de acondicionamiento deben incluir filtros de ruido pasabajos para suprimir el ruido de 50 o 60 Hz, así como amplificadores de instrumentación para reforzar el nivel de la señal de salida de las mismas. La amplificación mejora también la resolución o sensibilidad de la medida.

Sistemas de adquisición de datos

Los acondicionadores de señal son una parte vital de los sistemas de **adquisición de datos**. La adquisición de datos (DAQ: *Data Acquisition*) es el proceso de convertir un fenómeno físico, digamos la temperatura o la presión, en una señal eléctrica y medir esta última con el fin de extraer información para presentarla, registrarla o actuar sobre un proceso. En este caso, la conversión del fenómeno físico en una señal eléctrica la realiza el sensor o transductor. Una vez en el dominio eléctrico, esta señal se mide utilizando circuitos de acondicionamiento, así como *hardware* y *software* DAQ, para ser posteriormente procesada por el controlador del sistema. Los sistemas de adquisición de datos se examinan en el **capítulo 12** de la sección de **Automatización**.

El propósito primario de un circuito de acondicionamiento en un sistema DAQ, es modificar la salida del sensor en una forma que pueda ser óptimamente convertida a un formato digital por su ADC (convertidor análogo-digital). Para ello, el acondiconador

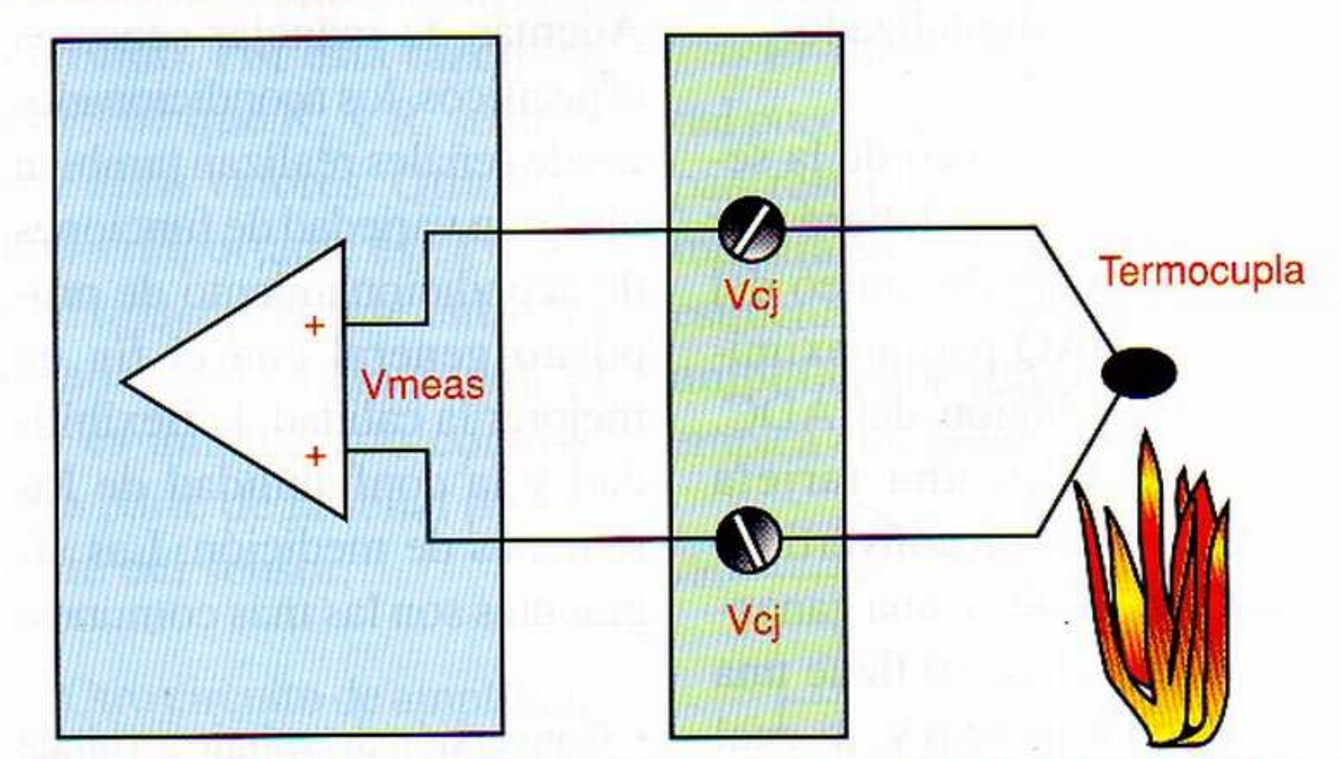


Figura 14.2 *La conexión de los alambres de una termocupla a un sistema de medición de temperatura crea una unión termoeléctrica adicional, llamada la unión fría, la cual debe ser compensada con un circuito acondicionador de señal.*

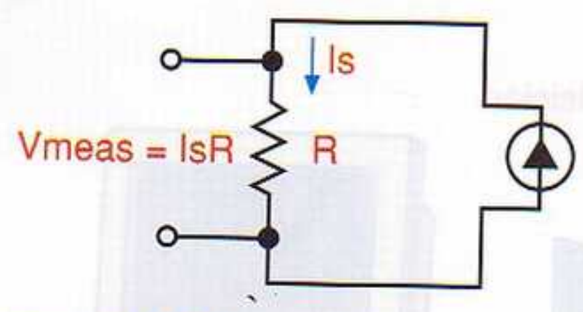


Figura 14.3 Las señales de corriente, usualmente de 0-20 mA o 4-20mA, se convierten fácilmente a señales de voltaje utilizando resistencias de precisión

debe garantizar que en la entrada del ADC se cumplan, entre otros, los siguientes requisitos:

1. La señal de entrada debe ser una forma de onda de voltaje. Puesto que muchos dispositivos suministran una señal de corriente, usualmente en el rango de 4 a 20 mA o de 0 a 20 mA, el acondicionador debe convertirla a una señal de voltaje. Esta operación puede ejecutarse fácilmente utilizando una resistencia de precisión, como se muestra en la **figura 14.3**. El voltaje resultante, $V_M=I_sR$, puede entonces ser amplificado, acondicionado y digitalizado.

2. El rango dinámico de la señal de entrada deberá ser igual al rango dinámico del sistema DAQ para maximizar la resolución del ADC. Por ejemplo, una tarjeta DAQ típica con convertidor ADC de 12 bits y una ganancia nominal de 50 tiene una resolución de 98µV, lo cual corresponde a unos 2°C para una termocupla J o K. Sin embargo, si se agrega un acondicionador de señal con una ganancia adicional de 100, la resolución de la medida se incrementa a 1µV, lo cual corresponde a unos 0.02°C de resolución.

3. La impedancia de la fuente de la señal de entrada debe ser lo suficientemente baja para que los cambios en la impedancia de entrada del sistema DAQ no afecten esa señal.

4. El ancho de banda de la señal de entrada debe ser limitado a menos de la mitad de la rata de muestreo de la conversión A/D. Por ejemplo, si la frecuencia de muestreo es de 20kHz, el acondicionador debe incluir un filtro pasabajo *anti-alias* que limite el ancho de banda de la señal de entrada del ADC por debajo de 10 kHz.

Funciones de acondicionamiento comunes

Además de manejar sensores específicos, los acondicionadores de señales realizan también una gran variedad de funciones de acondicionamiento de propósito general con el fin de mejorar la calidad, la flexibilidad y la confiabilidad de los sistemas de medición. Las siguientes son las más comunes:

- Conversión de voltaje a voltaje
- Amplificación
- Filtrado
- Comparación
- Aislamiento
- Multiplexaje
- Preprocesamiento
- Conversión de corriente a voltaje
- Conversión de resistencia a voltaje
- Conversión de capacitancia a voltaje
- Conversión de energía a voltaje

Convertidores de voltaje a voltaje

Muchos sensores entregan como salida una señal de voltaje. Por tanto, no se requieren circuitos de acondicionamiento para su conversión a un voltaje equivalente. Sin embargo, dependiendo de la amplitud y el ancho de banda de la señal entregada, así como de la impedancia del sensor, pueden ser necesarios acondicionadores para aumentar el rango dinámico, reducir el ancho de banda, acoplar impedancias, comparar con una señal de referencia, etc.

Desde este punto de vista juegan un papel muy importante los amplificadores, los filtros y los comparadores, cuyas características generales se examinan enseguida. Se asume que el lector está familiarizado con la teoría de amplificadores operacionales.

Amplificadores

Debido a que las señales del mundo real son frecuentemente muy pequeñas en magnitud, las mismas requieren

ser acondicionadas a través de **amplificadores** para reforzar su nivel y conseguir que se acoplen mejor al rango del ADC del sistema de adquisición de datos. De este modo se incrementan la exactitud, la resolución, la sensibilidad y la relación señal a ruido (SNR) de la medida. Aunque la mayoría de tarjetas DAQ incluyen amplificadores para este propósito, muchos sensores, tales como las termocuplas, generalmente requieren amplificación adicional.

El circuito de amplificación más comúnmente usado para acondicionamiento de señales es el **amplificador inversor** mostrado en la **figura 14.4**. Esta estructura tiene una ganancia de voltaje A_V=Vo/Vi =-R_F/R_I, una impedancia de entrada igual a R_I y una impedancia de salida casi cero. La misma permite acoplar el nivel del voltaje de salida de un sensor dado, al nivel necesario requerido por el sistema de adquisición de datos. También proporciona acoplamiento de impedancias entre este último y el sensor.

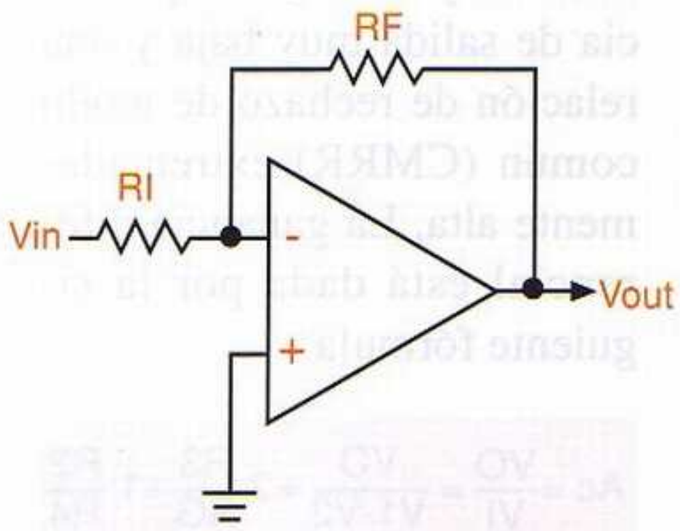


Figura 14.4 Amplificador inversor

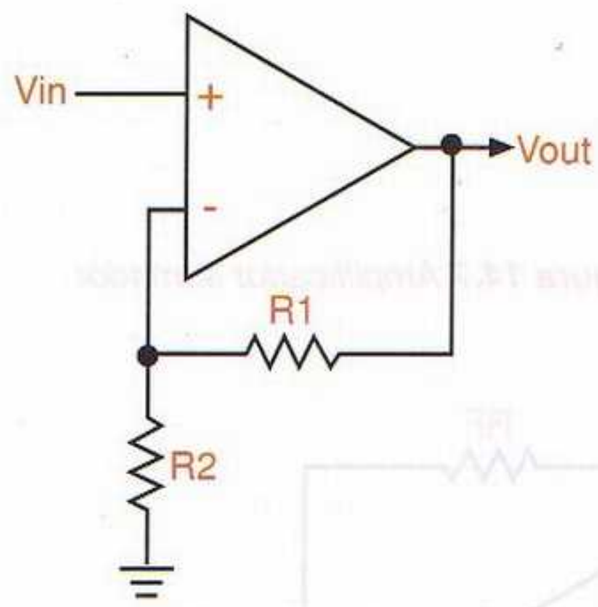


Figura 14.5 Amplificador no inversor

Con respecto al circuito anterior, es importante recordar que la excursión del voltaje de salida está limitada por la tensión de alimentación del amplificador. Cuando se excede este nivel, por ejemplo ±15V, se produce recorte o *clipping*. Además de estar limitado el rango dinámico, también lo están el ancho de banda y la figura de ruido. Esto se debe a que todos los amplificadores operacionales tienen un producto ganancia por ancho de banda fijo e introducen ruido a la señal. Las resistencias también introducen ruido. Por esta razón, no conviene que R_F y R_I sean de muy altos valores. Otra limitación importante es el voltaje de *offset* presente entre las entradas del operacional, el cual es amplificado como si fuera parte de la señal proveniente del sensor.

Otro circuito de amplificación comúnmente usado es el **amplificador no inversor** mostrado en la **figura 14.5**. Esta estructura tiene una ganancia de voltaje A_V=Vo/Vi =(1+R_F/R_I), una impedancia de entrada casi infinita y una impedancia de salida casi cero. El circuito es ideal para sensores que tienen una alta impedancia de fuente. Además, puede actuar como *buffer* o amplificador de ganancia unitaria si se retira R_I y se pone en cortocircuito R_F, como se muestra en la **figura 14.6**.

Con un amplificador operacional pueden también sumarse dos o más señales, mientras se amplifican, como se muestra en la **figura 14.7**. Esta estructura se conoce como un **amplificador sumador** y puede ser utilizada para combinar las salidas de varios sensores, por ejemplo un arreglo de micrófonos. La salida está dada por la siguiente fórmula:

$$V_{OUT} = V1\frac{RF}{R1} + V2\frac{RF}{R2} + V3\frac{RF}{R3}$$

El amplificador operacional puede también ser utilizado para restar dos señales, como se muestra en la **figura 14.8**. Esta estructura se conoce como un **amplificador diferencial** y se emplea comúnmente para reti-

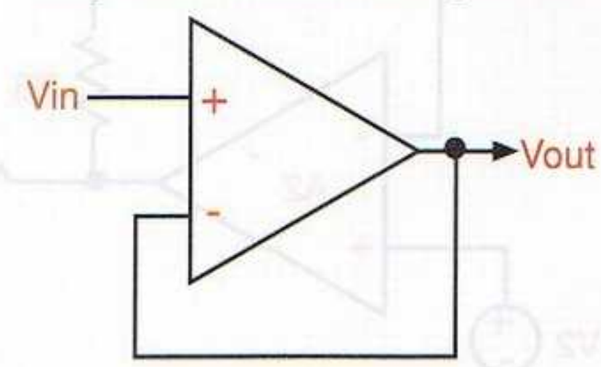


Figura 14.6 Buffer de ganancia unitaria

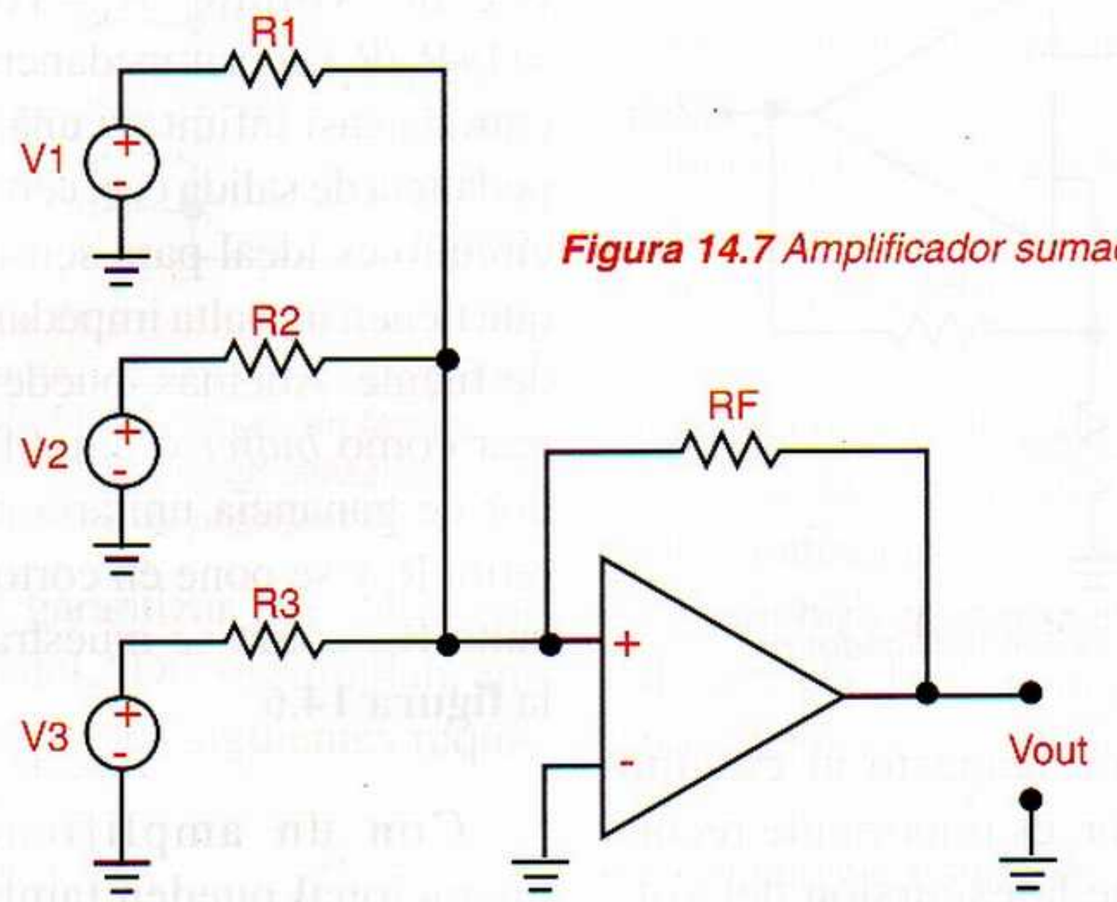


Figura 14.7 Amplificador sumador

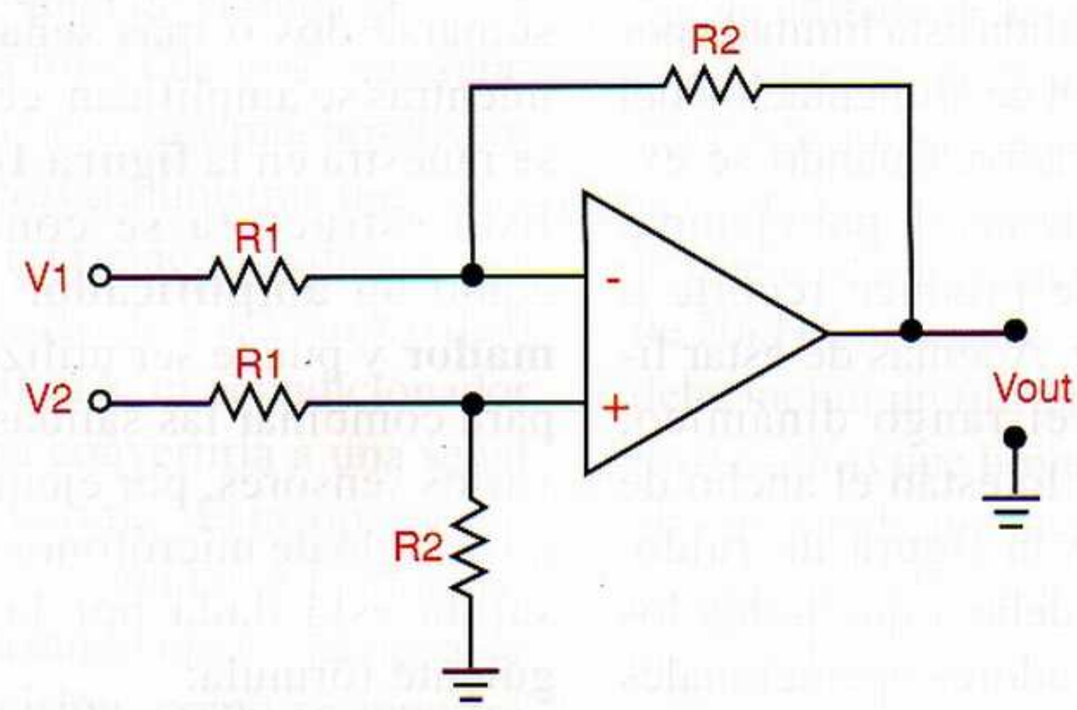


Figura 14.8 Amplificador diferencial

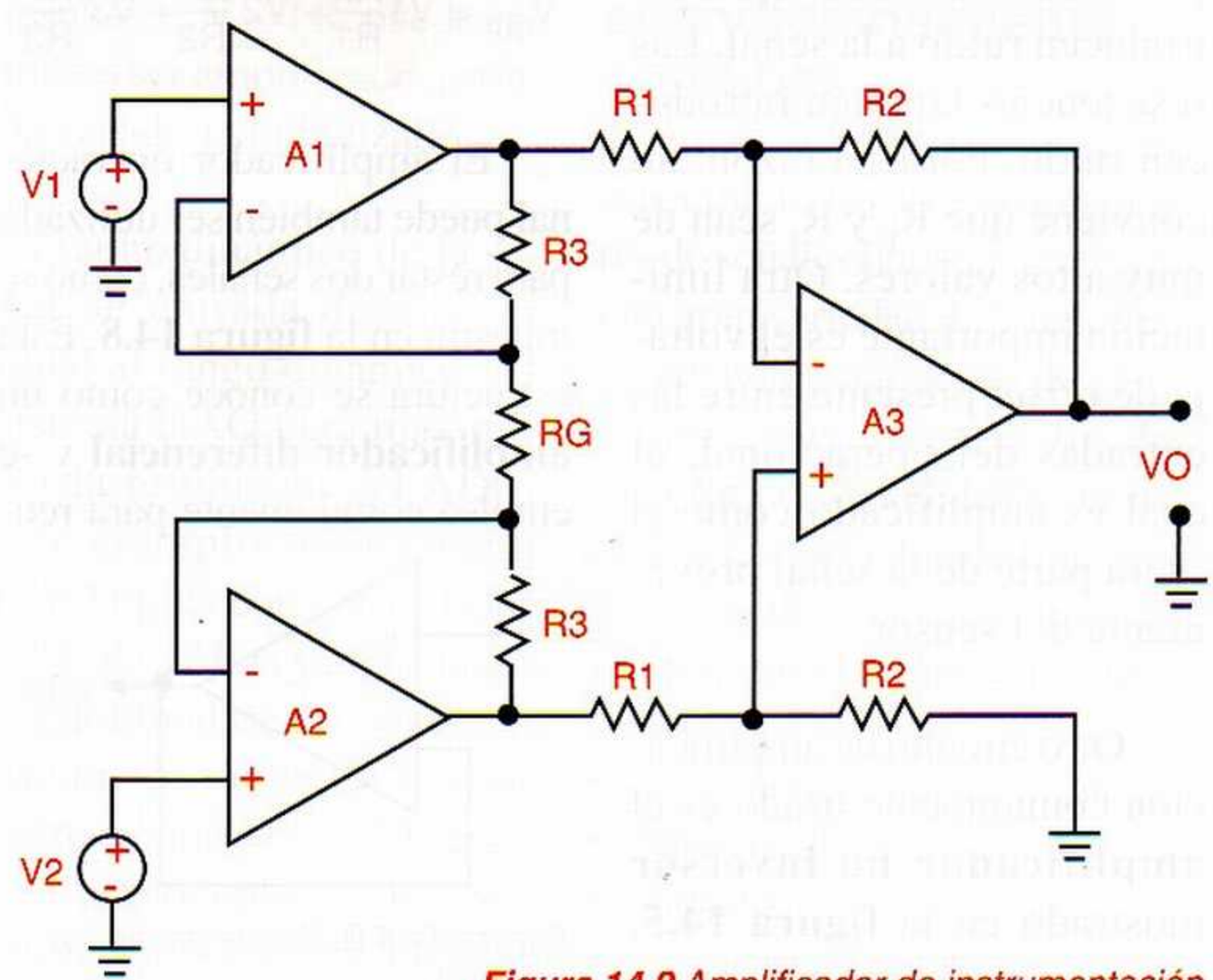


Figura 14.9 Amplificador de instrumentación

rar voltajes de *ofsett* DC indeseables. También puede ser empleado para remover ***loops* de tierra**, es decir diferencias en los potenciales de tierra del sensor y del circuito de adquisición de datos. La salida está dada por la siguiente fórmula, donde V1 puede ser la salida del sensor y V2 la señal que debe ser eliminada:

$$V_{OUT} = (V2-V1) \bullet \frac{R2}{R1}$$

Otro circuito de amplificación muy utilizado, probablemente el más importante, es el **amplificador de instrumentación**, formado por un amplificador diferencial con un amplificador no inversor en cada una de sus entradas, como se muestra en la **figura 17.9**.

Note que en lugar de aterrizar las resistencias, las mismas se conectan entre sí para crear una resistencia común. Esta estructura proporciona una ganancia finita, exacta y estable, usualmente entre 1 y 1 000, una impedancia de entrada muy alta, una impedancia de salida muy baja y una relación de rechazo de modo común (CMRR) extremadamente alta. La ganancia diferencial está dada por la siguiente fórmula:

$$Ac = \frac{VO}{VI} = \frac{VO}{V1-V2} = 2\frac{R3}{RG} + 1\frac{R2}{R4}$$

Filtros

Además de amplificadores, los acondicionadores de señales incluyen también filtros para rechazar el ruido de 50 o 60 Hz, así como otras señales indeseables que corrompen la salida de los sensores. También se requieren filtros para prevenir el *aliasing* o aparición de frecuencias alias, un fenómeno que surge cuando una señal es submuestrada, es decir muestreada muy lentamente. Esta distorsión sólo puede ser evitada retirando, mediante un filtro pasabajos, las componentes con frecuencias por encima de la rata de Nyquist (la mitad de la frecuencia de muestreo) antes de que la señal sea muestreada y digitalizada.

Una forma de limitar el ancho de banda de la señal incidente, es utilizando un filtro pasabajos con amplificador operacional, como el mostrado en la **figura 14.10**. Esta estructura es básicamente un amplificador no inversor con la resistencia de realimentación reemplazada por una red RC. En la **figura 14.11** se muestra la forma típica de la respuesta de frecuencia de este filtro. Note que a partir de la frecuencia de corte, la ganancia cae desde su valor nominal de bajas frecuencias (Ho) hasta 0 a una rata de 20dB por década.

La resistencia de entrada de un amplificador inversor también puede ser reemplazada por una red RC para crear un filtro pasaaltos, como se indica en la **figura 14.12**. La curva de respuesta de frecuencia correspondiente se muestra en la **figura 14.13**. En este caso, antes de la frecuencia de corte, la ganancia de voltaje se reduce a una rata de 20dB/ con respecto a su valor nominal en altas frecuencias (Ho)

Se pueden crear filtros de más alto orden, los cuales tienen ratas de atenuación más rápidas, conectando en cascada varios filtros de primer orden. Alternativamente, un filtro puede incluir más de una red RC para incrementar su orden.

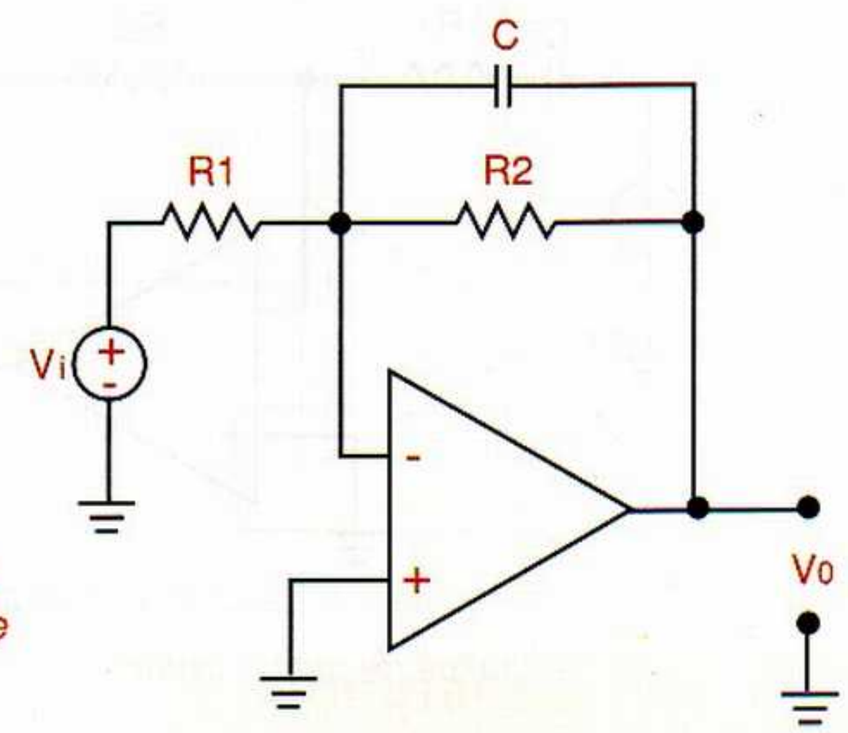


Figura 14.10 Filtro activo pasabajos de primer orden

Convertidores de corriente a voltaje

Algunos sensores proporcionan como salida una corriente en lugar de un voltaje. El ejemplo más representativo de sensores de este tipo es el fotodiodo, el cual tiene una salida de corriente proporcional a la cantidad de luz incidente sobre él. En estos casos, se necesita de circuitos de acondicionamiento adecua-

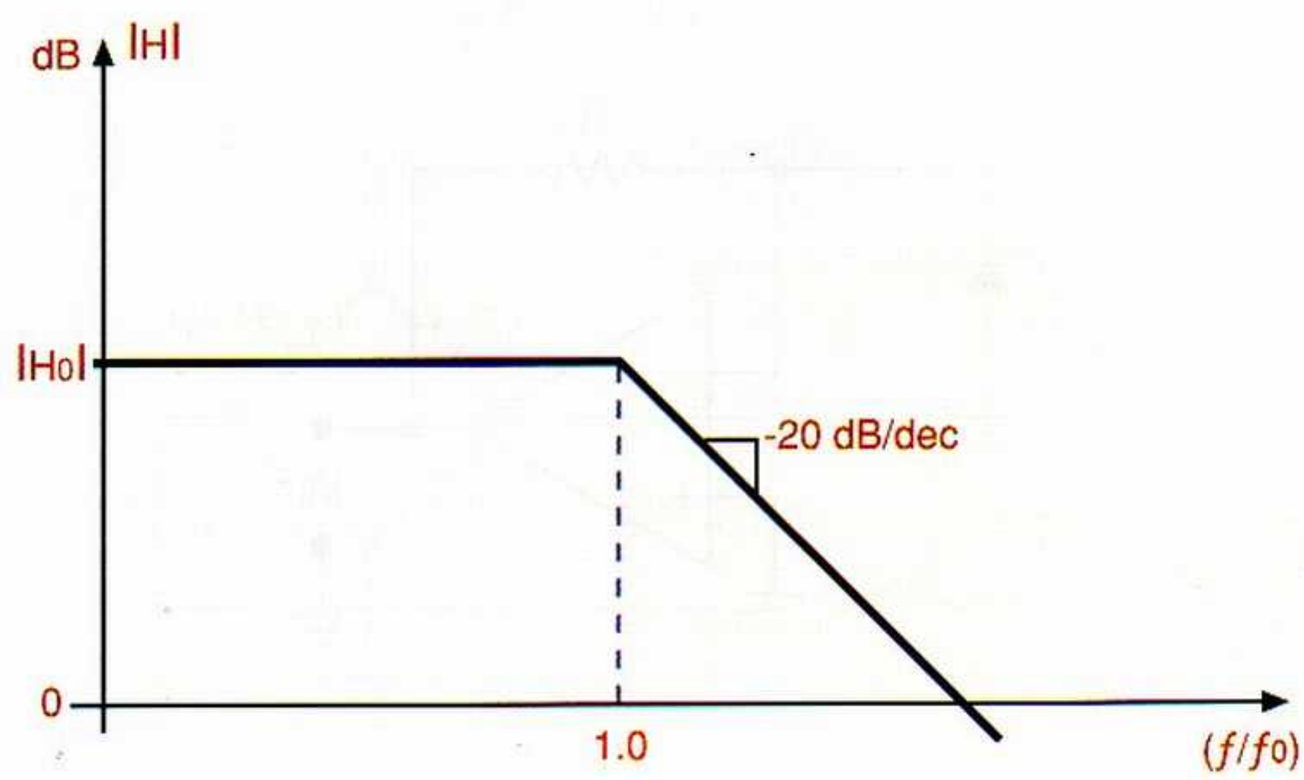


Figura 14.11 Respuesta de frecuencia de un filtro activo pasabajos

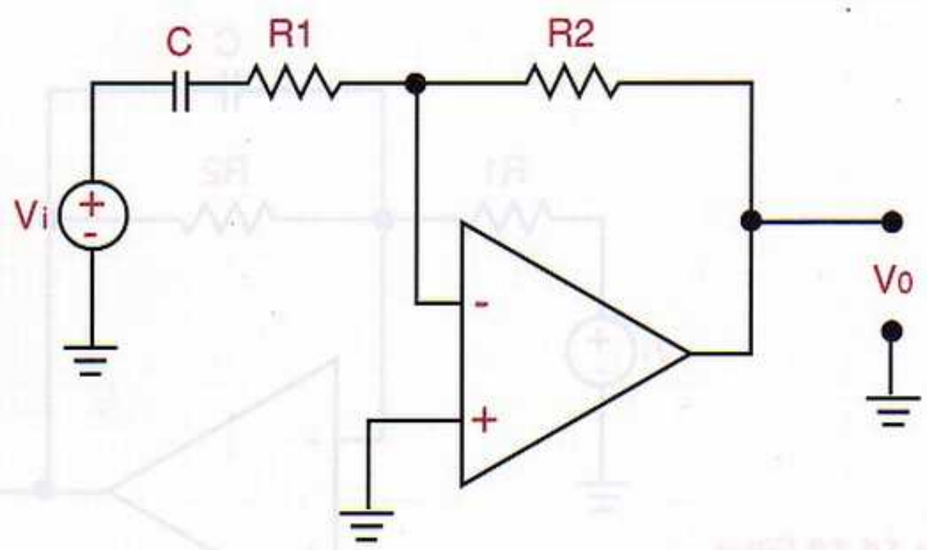


Figura 14.12 Filtro pasaaltos de primer orden

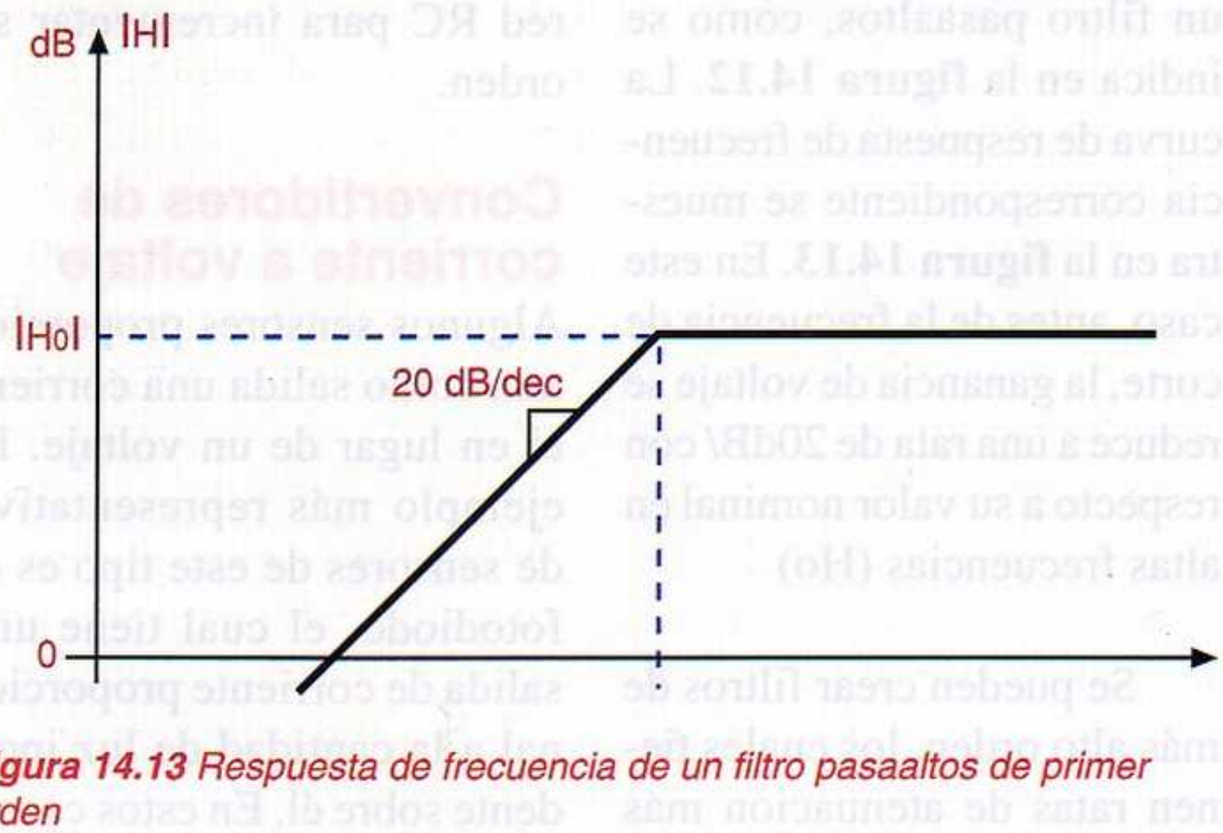


Figura 14.13 Respuesta de frecuencia de un filtro pasaaltos de primer orden

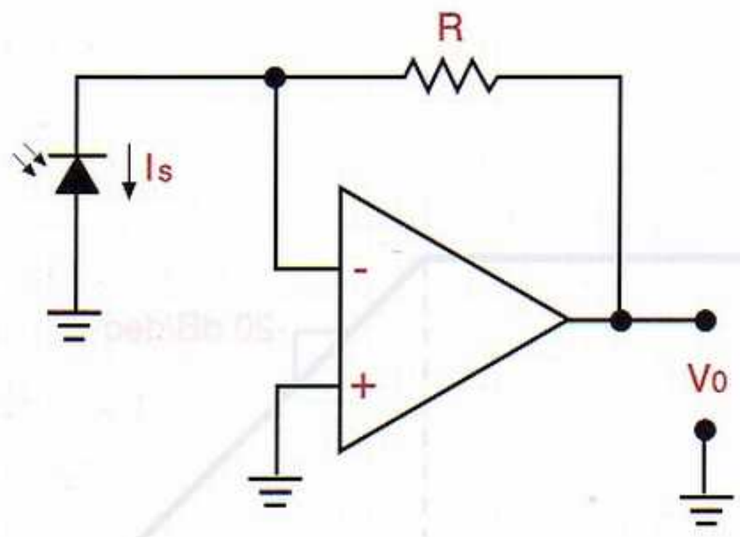


Figura 14.14 Conexión de un fotodiodo a un amplificador de corriente

dos para convertir la salida de corriente del sensor en un voltaje equivalente.

Para convertir corriente a voltaje, usualmente se utiliza una configuración amplificadora inversora, puesto que el amplificador no inversor drena muy poca corriente. En la **figura 14.14** se muestra como ejemplo un amplificador de corriente conectado a un fotodiodo. Note que el circuito es idéntico al amplificador no inversor, excepto que se ha retirado la resistencia de entrada. A medida que se incrementa la cantidad de luz, la corriente de salida del fotodiodo, también se incrementa o lo hace de manera proporcional.

Conversión de resistencia a voltaje

Muchos sensores exhiben un cambio en su resistencia eléctrica en respuesta a la cantidad que tratan de medir. Algunos ejemplos son las galgas, cuya resistencia disminuye con la fuerza aplicada; los termistores, cuya resistencia cambia con la temperatura; y los micrófonos de carbón, que alteran su resistencia en respuesta a los cambios en la presión acústica. En todos estos casos, debe convertirse la resistencia del dispositivo en un voltaje útil que pueda ser leído por un ADC.

Existen dos formas de convertir la resistencia de un

sensor en un voltaje equivalente. La primera, y la más simpe, es aplicando un voltaje a una red resistiva divisora de voltaje formada por una resistencia de referencia y la resistencia del sensor, como se muestra en la **figura 14.15**. El voltaje que aparece a través del sensor, o la resistencia de referencia, generalmente se transfiere al ADC a través de un *buffer*. El voltaje de salida esta dado por:

$$Vout = \frac{Rm}{Rm+Rf} = \frac{1}{1 + Rf/Rm}$$

El problema con este método de medición de resistencia es que el amplificador esta amplificando el voltaje completo medido a través del sensor. Podría ser mucho mejor amplificar únicamente el cambio en el voltaje debido a un cambio en la resistencia del sensor. Esto puede conseguirse utilizando un puente de Wheatstone, como se muestra en la **figura 14.16**.

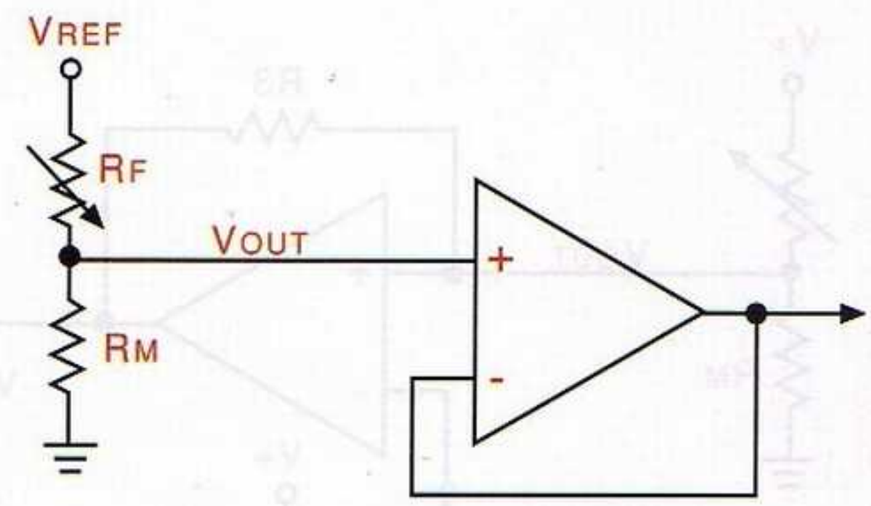


Figura 14.15 Conversion de resistencia a voltaje mediante divisor resistivo

En este caso, si R1 se hace igual a R, la salida aproximada del circuito está dada por la fórmula indicada en la misma figura.

En esta expresión, A representa la ganancia del amplificador de instrumentación, y δ el cambio en la resistencia del sensor correspondiente a alguna acción física. Note en esta ecuación que la ganancia puede ser fijada a un valor relativamente alto, debido a que únicamente se amplifica el cambio en el voltaje causado por un cambio en la resistencia del sensor.

Comparadores

Algunas veces no es necesrio enviar el rango entero de voltajes entregados por un sensor al convertidor A/D. En su lugar, muchas veces un sensor se usa simplemente como un interruptor. En estos casos, debe utilizarse un comparador de voltaje, como se muestra en la **figura 14.17**. En este caso, el comparador toma el voltaje de salida análogo del sensor y lo compara con un voltaje de referencia o umbral. Si el voltaje del sensor es mayor que el de referencia, la salida del circuito es máxima (5V). Si la salida del sensor es menor que la referencia, la salida del circuito es mí-

$$V0 = A\frac{R}{R1 + R} VREF \frac{\delta}{1 + (R/R1)(1 + \delta)}$$

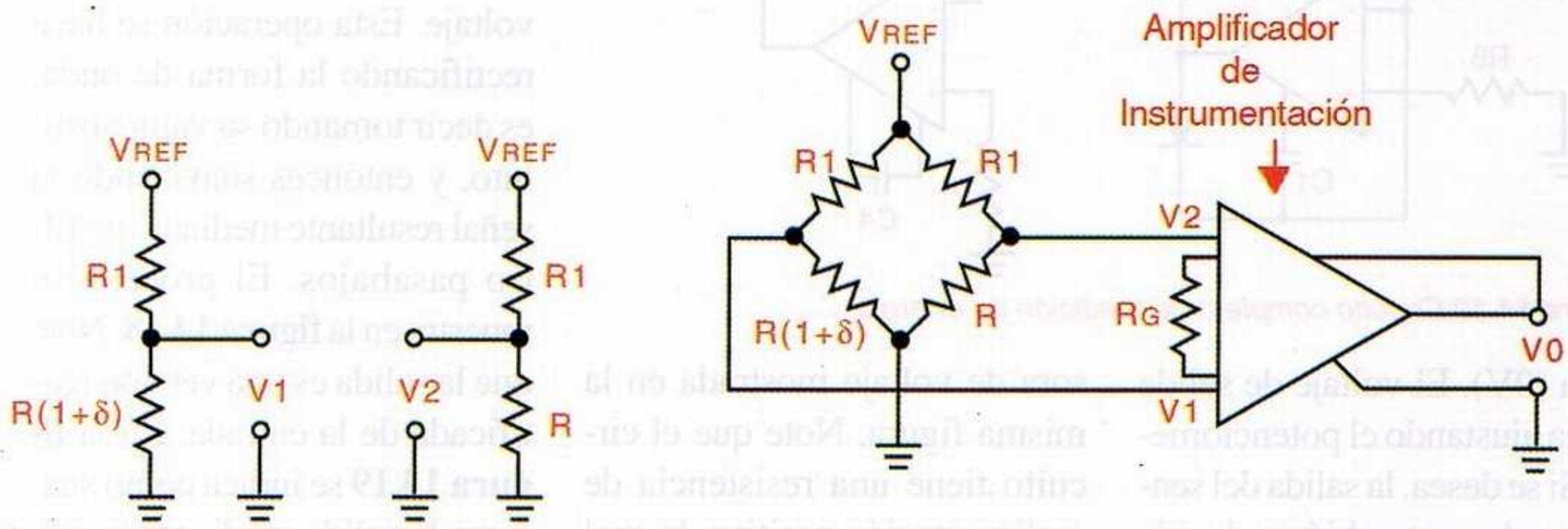


Figura 14.16 Puente resistivo conectado a un amplificador de instrumentación

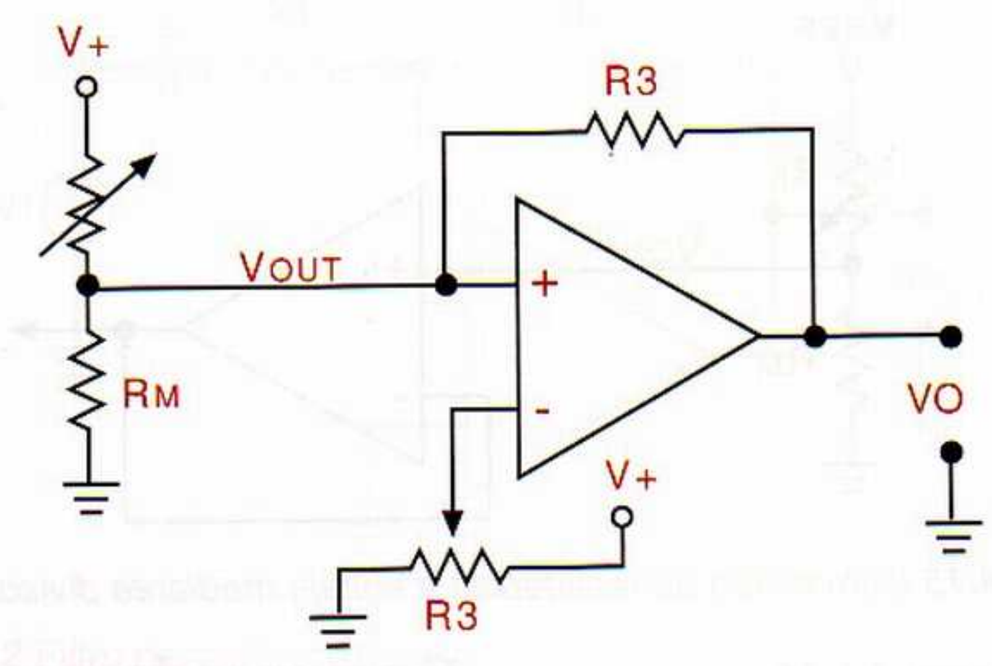


Figura 14.17 Comparadores de voltaje

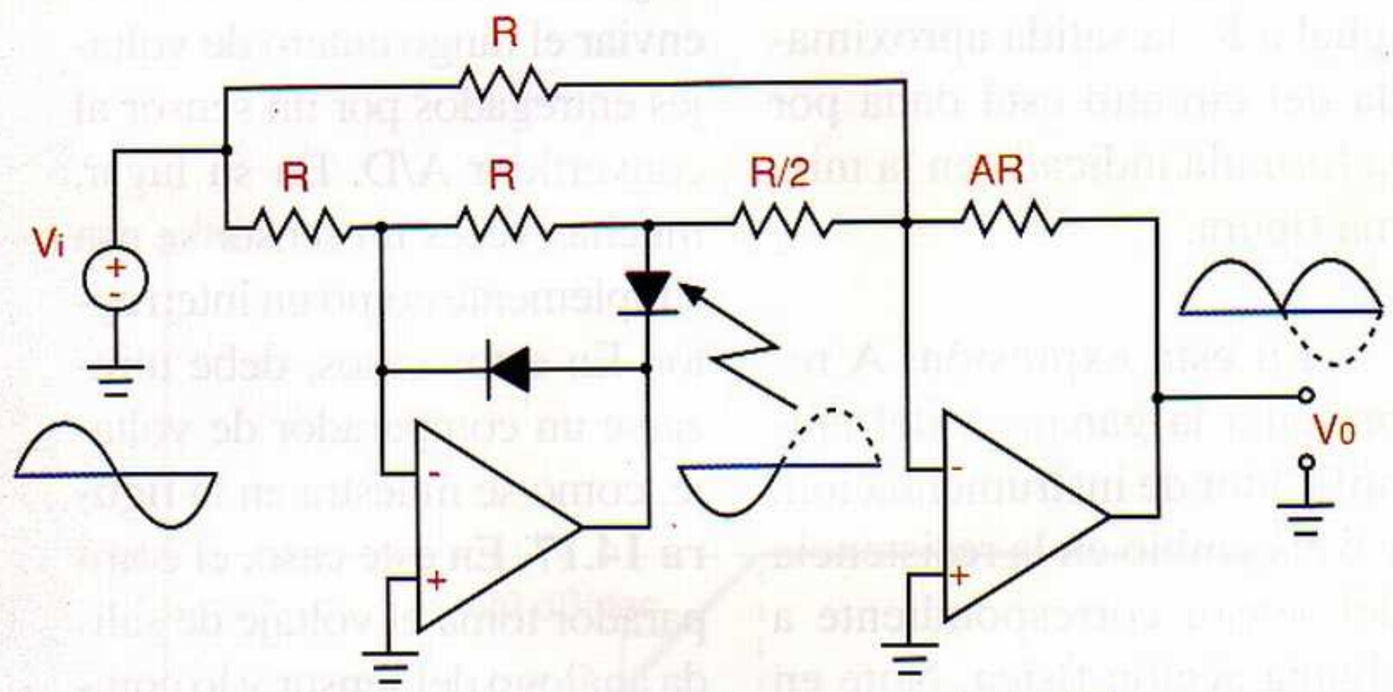


Figura 14.18 Principio de la Conversión de energía a voltaje

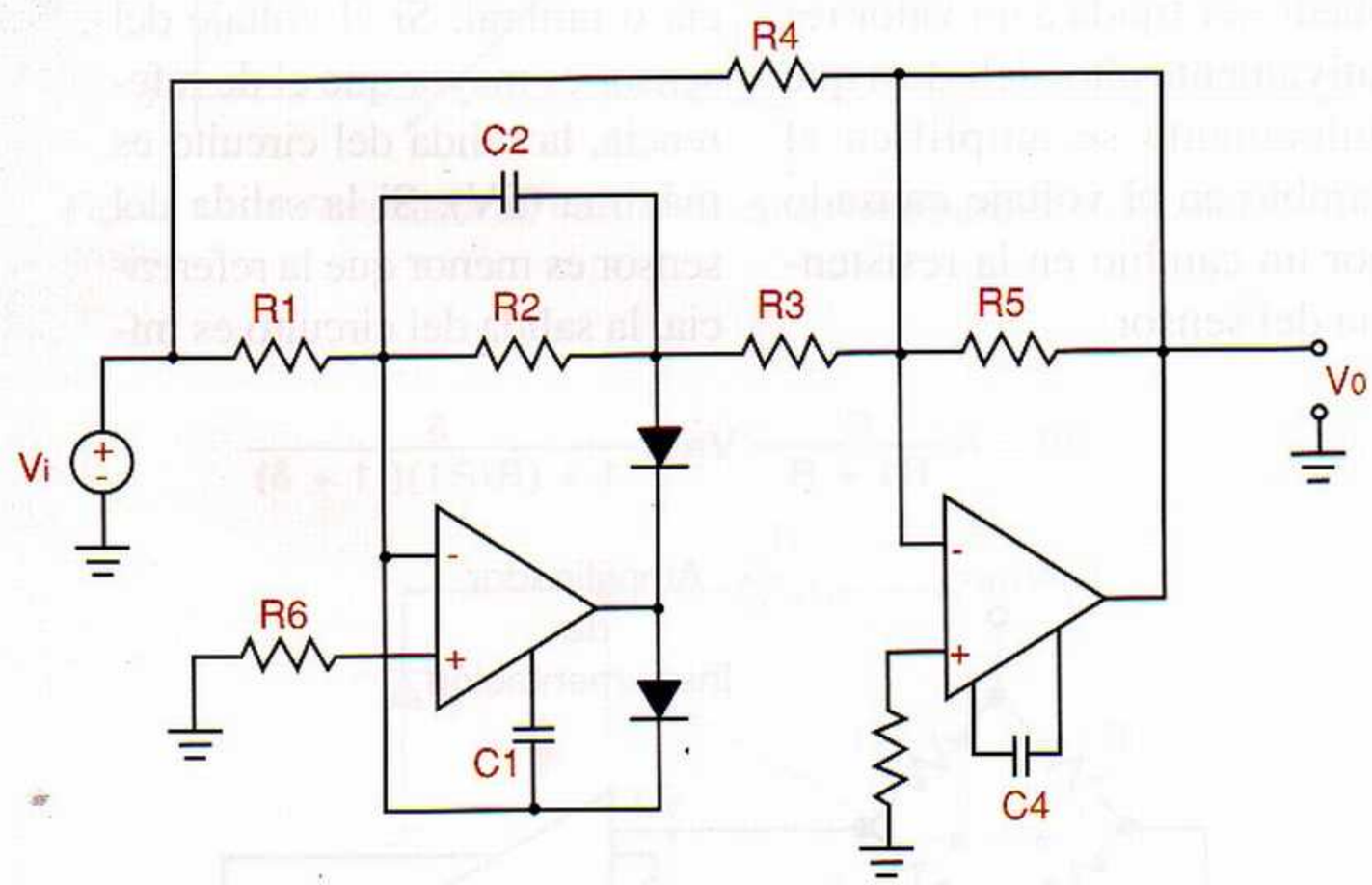


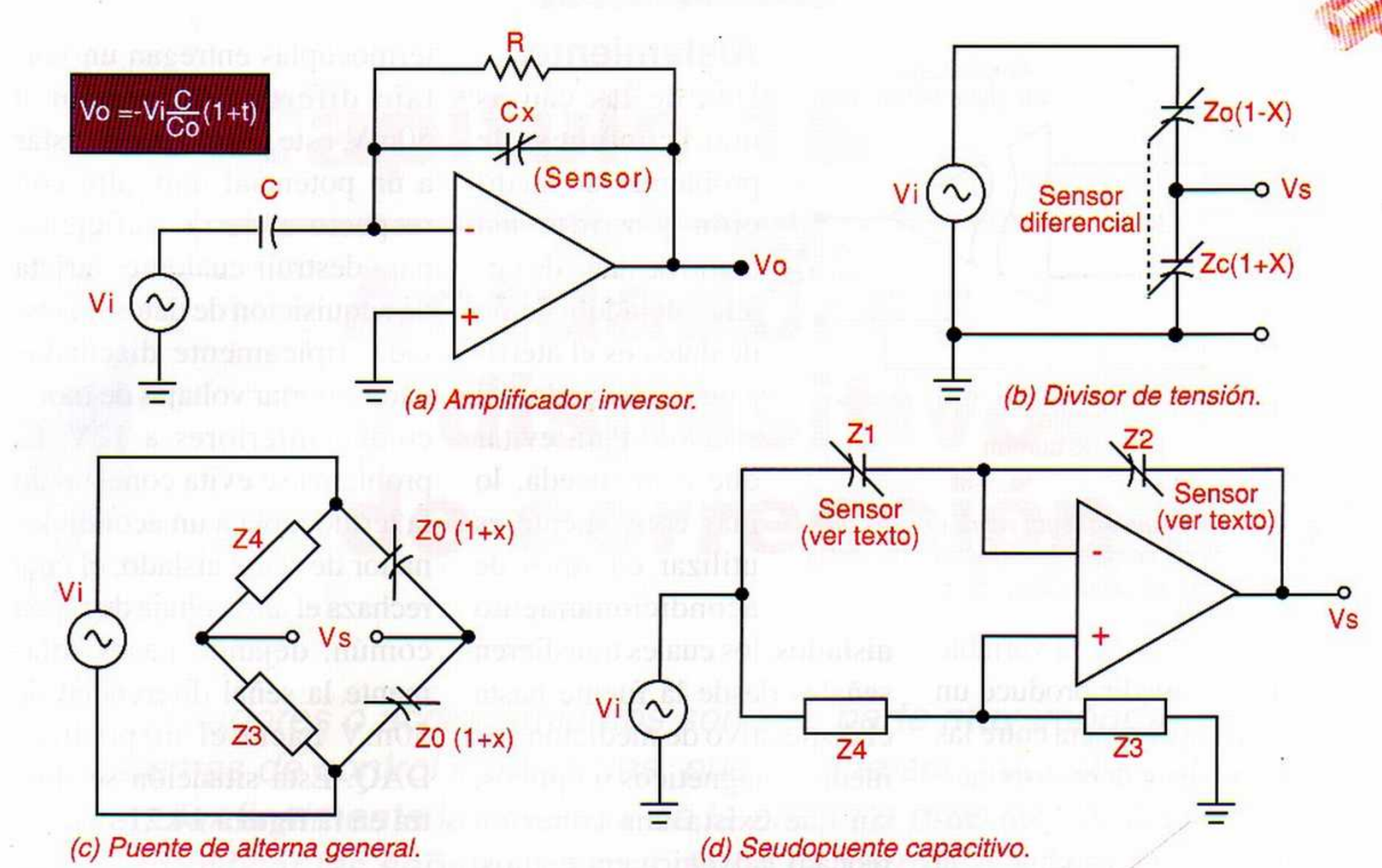
Figura 14.19 Circuito completo de medición de energia

nima (0V). El voltaje de salida se fija ajustando el potenciometro. Si se desea, la salida del sensor puede ser también reducida utilizando la red resistiva divisora de voltaje mostrada en la misma figura. Note que el circuito tiene una resistencia de realimentación positiva, la cual asegura que la salida del comparador excursione rápida y completamente desde su valor máximo hasta su valor mínimo, y viceversa.

Un ejemplo de aplicación de un comparador es el caso de una resistencia sensora de fuerza o FSR (*force sensing resistor*). Se puede utilizar un potenciómetro para ajustar la sensibilidad del interruptor. Este tipo de dispositivos exhiben una región en la cual la resistencia varía rápidamente en respuesta a un cambio relativamente pequeño en la fuerza aplicada. Este comportamiento puede ser usado para crear una salida ON/OFF, lo cual resulta muy útil en dispositivos tales como teclados de membrana.

Convertidores de energía a voltaje

En algunas situaciones, la señal de salida de un sensor es una señal extremadamente compleja, pero sólo se necesita conocer la energía de la forma de onda. Por tanto, debe efectuarse una conversión de energía a voltaje. Esta operación se hace rectificando la forma de onda, es decir tomando su valor absoluto, y entonces suavizando la señal resultante mediante un filtro pasabajos. El proceso se muestra en la **figura 14.18**. Note que la salida es una versión rectificada de la entrada. En la **figura 14.19** se indica como suavizar la salida mediante la adición de algunos condensadores.



(a) Amplificador inversor. (b) Divisor de tensión. (c) Puente de alterna general. (d) Seudopuente capacitivo.

Figura 14.20 *Circuitos de acondicionamiento para sensores capacitivos*

Conversión de capacitancia a voltaje

Muchos sensores utilizan efectos capacitivos para detectar la proximidad de objetos, así como para medir desplazamientos, diferencias de presión, y otras variables físicas. En la **figura 14.20** se muestran algunos ejemplos de circuitos de acondicionamiento sencillos para sensores de este tipo. En todos estos casos, se utiliza como excitación una señal AC.

El amplificador inversor de la **figura 14.20a**, en particular, es adecuado para linealizar la respuesta de sensores de desplazamiento capacitivos sencillos, basados en la variación de la distancia entre las placas. El divisor de tensión de la **figura 14.20b**, por su parte, es adecuado para sensores capacitivos lineales de salida diferencial. Se asume que la impedancia del sensor (Zc) varía con la distancia (*x*) en la forma *Zo (1+x)*, siendo *Zo* la impedancia nominal.

Bajo esta condición, el voltaje de salida (*Vs*) varía linealmente con la distancia (*x*) según la relación *Vs=Vi(1+x)/2*, donde hay un término fijo (*Vi/2*) que puede llegar a tener una importancia relativa grande. Para eliminar este inconveniente, la solución es emplear un puente de impedancias como el mostrado en la **figura 14.20c**.

En este caso, las dos impedancias que constituyen el sensor diferencial, es decir *Zo(1+x)* y *Zo(1-x)*, se disponen en los brazos Z1 y Z2, respectivamente. Las otras impedancias (Z3 y Z4), se escogen iguales a Zo. Bajo esta condición, el voltaje de salida (*vs*) está dado por *vs=- (vi/2)x*, donde existe proporcionalidad entre Vs y x.

Finalmente, en la **figura 14.20d** se muestra un puente con amplificador operacional (**seudopuente**), adecuado para sensores capacitivos simples, el cual produce siempre una salida lineal, independientemente del parámetro que produce la variación de la capacitancia. El voltaje de salida (vs) está dado por:

$$Vs = Vi\left(\frac{Z3/Z4 - Z2/Z1}{1 + Z3/Z4}\right)$$

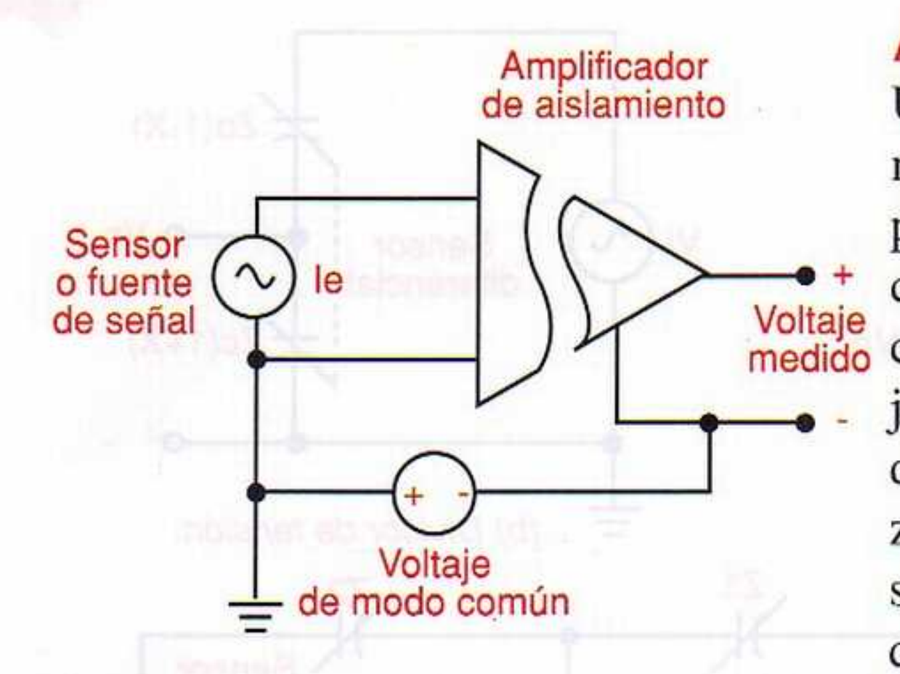


Figura 14.21 El aislamiento retira errores de voltaje en modo común, tipicamente causados por diferencias en potenciales de tierra

En este caso, si la variable que se va a medir produce un cambio en la distancia entre las placas, el sensor debe disponerse en el lugar de Z2. Sin embargo, si lo que cambia es la permitividad o el área, el sensor debe colocarse en el lugar de Z1. En ambos casos, Z3 y Z4 pueden ser resistencias, mientras que Z1 o Z2 debe ser un condensador fijo. Por esto último, debe utilizarse una resistencia suficientemente baja para polarizar el amplificador operacional. Para sensores capacitivos diferenciales, se utiliza una configuración similar, excepto que se requieren dos amplificadores operacionales.

Aislamiento

Una de las causas más comunes de problemas de medición y ruido, así como de daño de tarjetas de adquisición de datos es el aterrizaje inadecuado del sistema. Para evitar que esto suceda, lo más conveniente es utilizar circuitos de acondicionamiento **aislados**, los cuales transfieren señales desde la fuente hasta el dispositivo de medición por medios magnéticos u ópticos, sin que exista una conexión física o galvánica entre ellos. De este modo se eliminan bucles de tierra, se bloquean transientes de alto voltaje y se rechazan altos voltajes de modo común, protegiendo tanto a los instrumentos de adquisición de datos como a los operarios mismos.

Por ejemplo, suponga que se monitorea una temperatura utilizando termocuplas soldadas a una máquina que opera con altos voltajes. Aunque las termocuplas entregan un voltaje diferencial inferior a 50mV, este último puede estar a un potencial muy alto con respecto a tierra, suficiente para destruir cualquier tarjeta de adquisición de datos no aislada, típicamente diseñadas para soportar voltajes de modo común inferiores a 12V. El problema se evita conectando la termocupla a un acondicionador de señal aislado, el cual rechaza el alto voltaje de modo común, dejando pasar solamente la señal diferencial de 50mV hacia el dispositivo DAQ. Esta situación se ilustra en la **figura 14.21**.

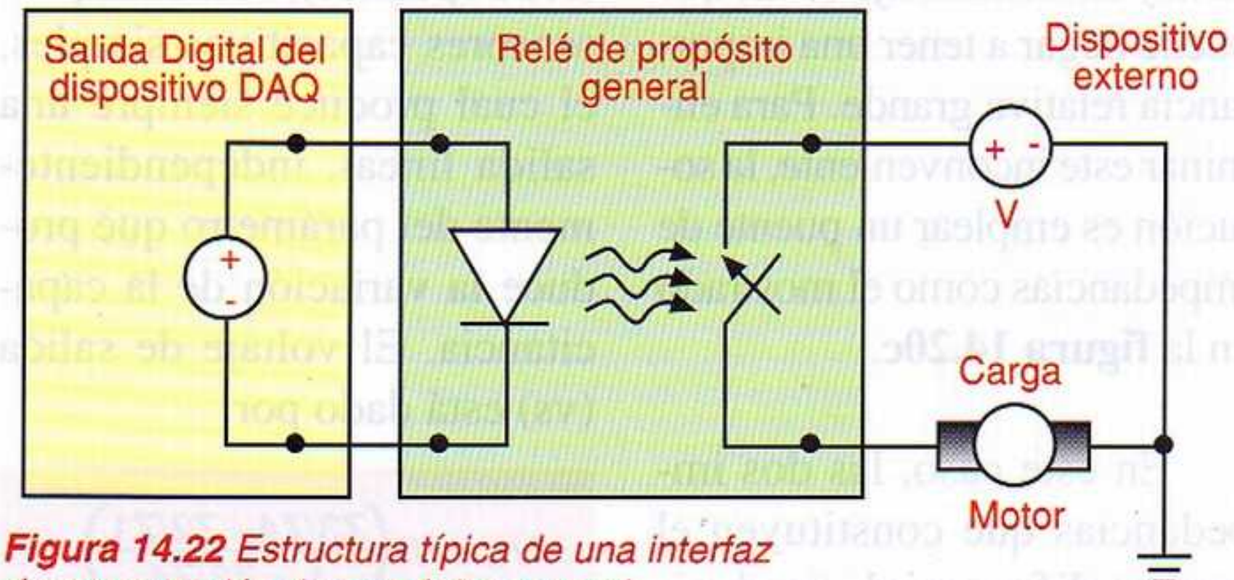


Figura 14.22 Estructura típica de una interfaz de conmutación de propósito general

Acondicionamiento de señales digitales

Las señales digitales suministradas por las tarjetas de adquisición de datos también necesitan de acondicionamiento, especialmente cuando se destinan para tareas de conmutación de propósito general; por ejemplo controlar cargas externas como motores, válvulas y lámparas. En estos casos, como interfaz con el mundo real se utiliza generalmente algún tipo de **relé**, electromecánico o de estado sólido (SSR), diseñado para manejar niveles de potencia mucho más altos de los que puede conmutar una tarjeta DAQ, **figura 14.22**. Adicionalmente, el relé aisla eléctricamente esta última de las señales de potencia, protegiéndola contra picos de alto voltaje y otros fenómenos. Ω

Capítulo 15

Actuadores y dispositivos de corrección final

Los actuadores o accionamientos son una parte muy importante en los sistemas de control industriales, puesto que son los encargados de regular finalmente la potencia de la planta o proceso, así como de amplificar las señales de mando de la misma. En este capítulo examinaremos algunos de ellos, haciendo especial énfasis en los servomotores y en los motores paso a paso, utilizados principalmente como ***preactuadores*** *en sistemas de control de movimiento.*

Generalidades

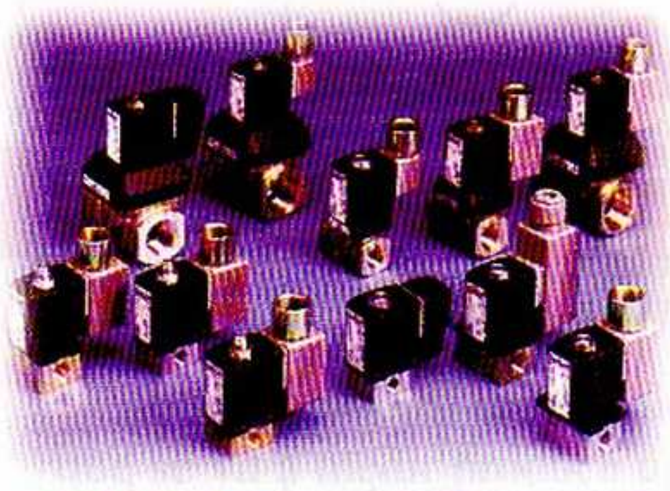
Los **actuadores**, también llamados **accionamientos**, son las partes de un sistema de control que se encargan de regular la potencia de la planta. Los mismos pueden estar gobernados directamente por el controlador del sistema o requerir algún tipo de **preaccionamiento** para amplificar la señal de mando. Los actuadores más comúnmente utilizados en aplicaciones industriales son los destinados a producir movimiento (motores y cilindros), transvasar fluidos (bombas y válvulas), y manipular calor (hornos, intercambiadores, etc.), **figura 15.1**.

Dependiendo del tipo de energía utilizado para su accionamiento, los actuadores pueden ser básicamente de cuatro tipos: eléctricos, hidráulicos, neumáticos y térmicos. Los siguientes son algunos ejemplos de cada tipo:

- **Actuadores eléctricos**: relés, contactores, motores, servomotores y motores paso a paso.
- **Actuadores hidráulicos y neumáticos**: válvulas, servoválvulas, cilindros, ventosas de sujeccion por vacío y bombas centrífugas.
- **Actuadores térmicos**: hornos y sistemas de enfriamiento.

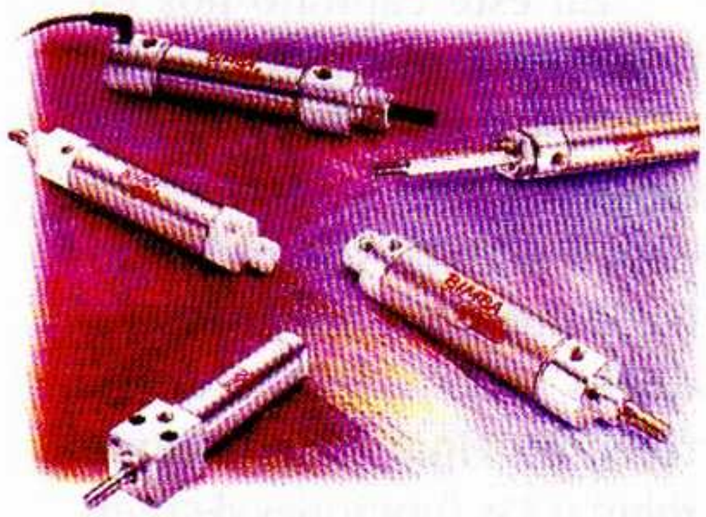
En este capítulo nos enfocaremos principalmente en el estudio de los servomotores AC y DC, y los motores paso a paso (PAP), utilizados básicamente como **preactuadores** o dispositivos de corrección final para complementar las funciones de regulación de los controladores. También examinaremos brevemente los principios de los hornos eléctricos y los sistemas de refrigeración. Los motores, relés y contactores se estudian en la sección de **Electricidad Industrial**. Los actuadores hidráulicos y neumáticos se tratan en la sección de **Automatización**.

(a) Posicionador servoneumático



(b) Válvulas de propósito general

(c) Bombas centrífugas



(d) Cilindros neumáticos

(e) Servomotores

Figura 15.1 Ejemplos de actuadores

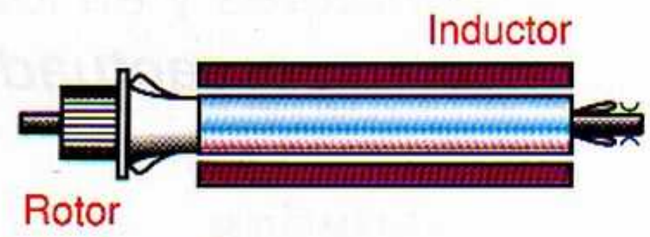
Servomotores

El término **servomotor** se aplica, en general, a cualquier motor que, en un sistema de lazo cerrado, utilice una señal de realimentación para monitorear su velocidad o posición en ambas direcciones, o, en un sistema de lazo abierto, utilice un equipo digital para proporcionar las señales de comando precisas que controlan estas variables. Los servomotores pueden ser DC o AC, operan con bajos niveles de potencia y están especialmente diseñados para proporcionar el gobierno preciso de la posición o la velocidad de objetos en sistemas de control de movimiento.

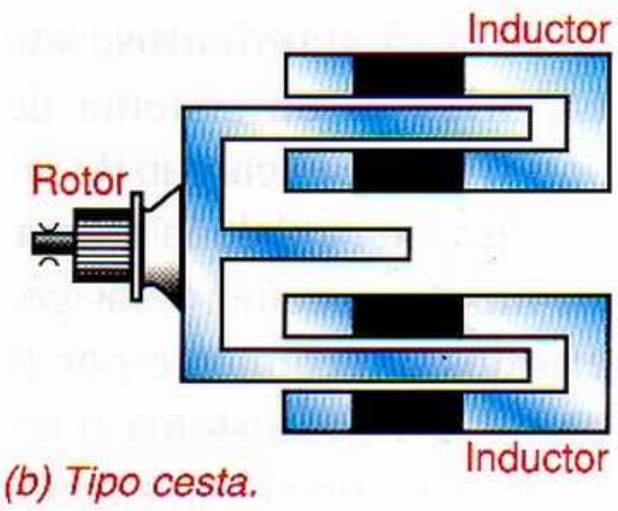
Los **servomotores DC** operan en forma similar a los motores DC de excitación independiente convencionales, excepto que sus características constructivas, principalmente la forma del rotor, **figura 15.2**, son ligeramente diferentes con el fin de obtener un comportamiento dinámico rápido y estable, así como un par de arranque importante. Pueden ser de rotor bobinado, de bobina móvil, o sin escobillas.

En todos estos casos, el movimiento del rotor se origina por la interacción de los campos magnéticos producidos por unas bobinas o unos conductores con los campos estacionarios creados por un juego de imanes permanentes.

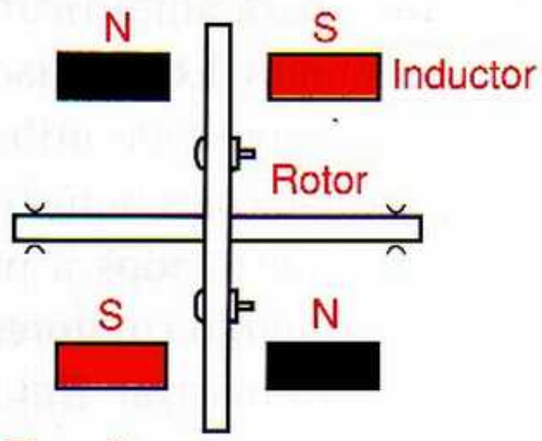
En la **figura 15.3** se muestra la estructura típica de un **servomotor DC de rotor bobinado**. En este caso, las bobinas se alojan en las ranuras de un núcleo de hierro y sus extremos se conectan a un conmutador. La corriente de excitación de las mismas se suministra a través de un par de escobillas, como en un motor DC convencional, excepto que las piezas polares del estator son imanes permanentes, en lugar de devanados de campo. Típicamente se utilizan estructuras de dos o cuatro polos, aunque también son comunes servomotores de seis o más polos. La característica velocidad-torque es similar a la de un motor DC tipo *shunt*.



(a) Alargado.



(b) Tipo cesta.



(c) Tipo disco.

Figura 15.2 Formas constructivas del rotor en sevomotores de CC.

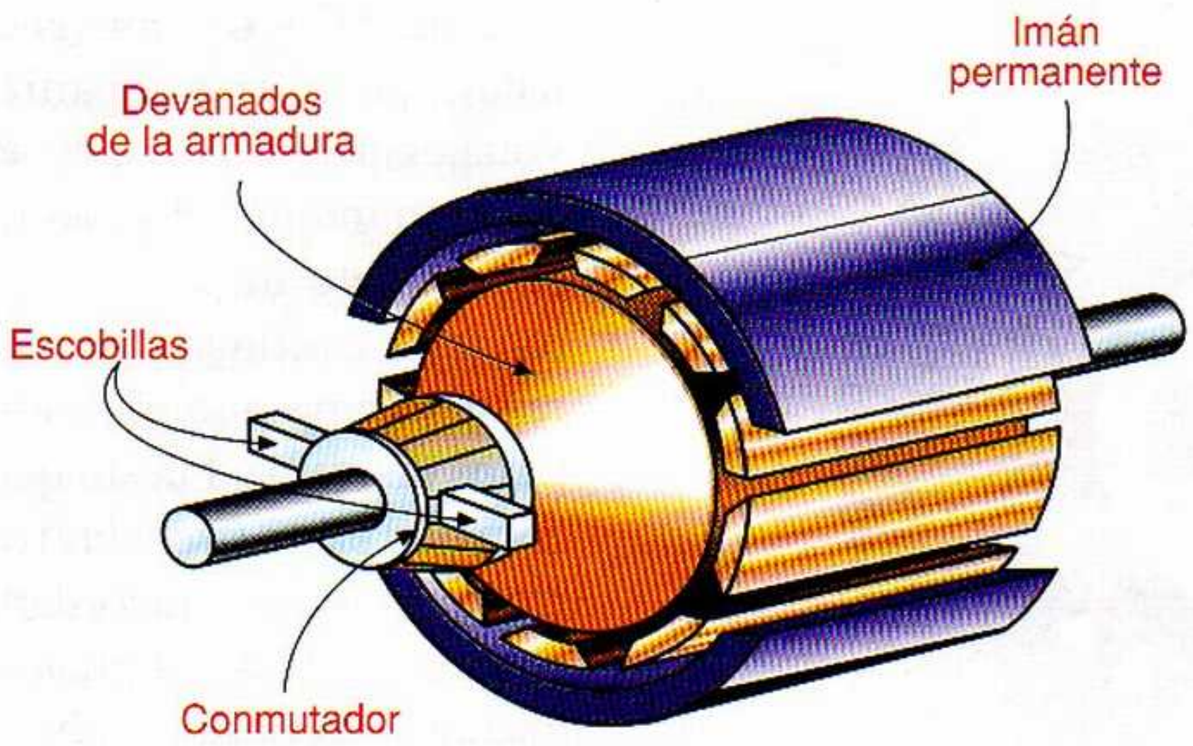


Figura 15.3 Estructura típica de un servomotor DC de rotor bobinado

En la **figura 15.4** se muestra la estructura típica de un **servomotor DC de bobina móvil**. En este caso, el rotor o armadura es básicamente un circuito impreso, fomado por un disco delgado de fibra de vidrio con una capa de conductores de cobre dispuestos radialmente en cada cara. La corriente de excitación de estos últimos se proporciona directamente a través de escobillas. El campo del estator lo proveen ocho pares de imanes permanentes, situados a cada lado del disco y paralelos al eje del motor. Este diseño proporciona una muy baja inercia, lo cual permite que el motor pueda acelerar, detenerse y cambiar de dirección muy rápidamente.

En la **figura 15.5** se muestra la sección transversal de un **servomotor DC sin escobillas**. En este caso, al contrario de lo que sucede en un servomotor DC convencional, el campo magnético es giratorio. Asimismo, el rotor está formado por imanes permanentes y el estator por devanados. La función de conmutación se realiza electrónicamente, conmutando la dirección de la corriente del estator a intervalos precisos en relación con la posición del campo magnético rotatorio. Este tipo de servos combinan las características de los motores AC y DC, y requieren para su operación de controles electrónicos y dispositivos internos de realimentación.

Los **servomotores AC**, por su parte, operan sobre el mismo principio de los motores monofásicos de inducción o de fase dividida. Al igual que estos últimos, utilizan un rotor en jaula de ardilla y dos juegos de devanados estatóricos energizados por dos voltajes AC desfasados 90°. Sin embargo, en lugar de recurrir a un condensador o una bobina para desarrollar la fase auxiliar, el

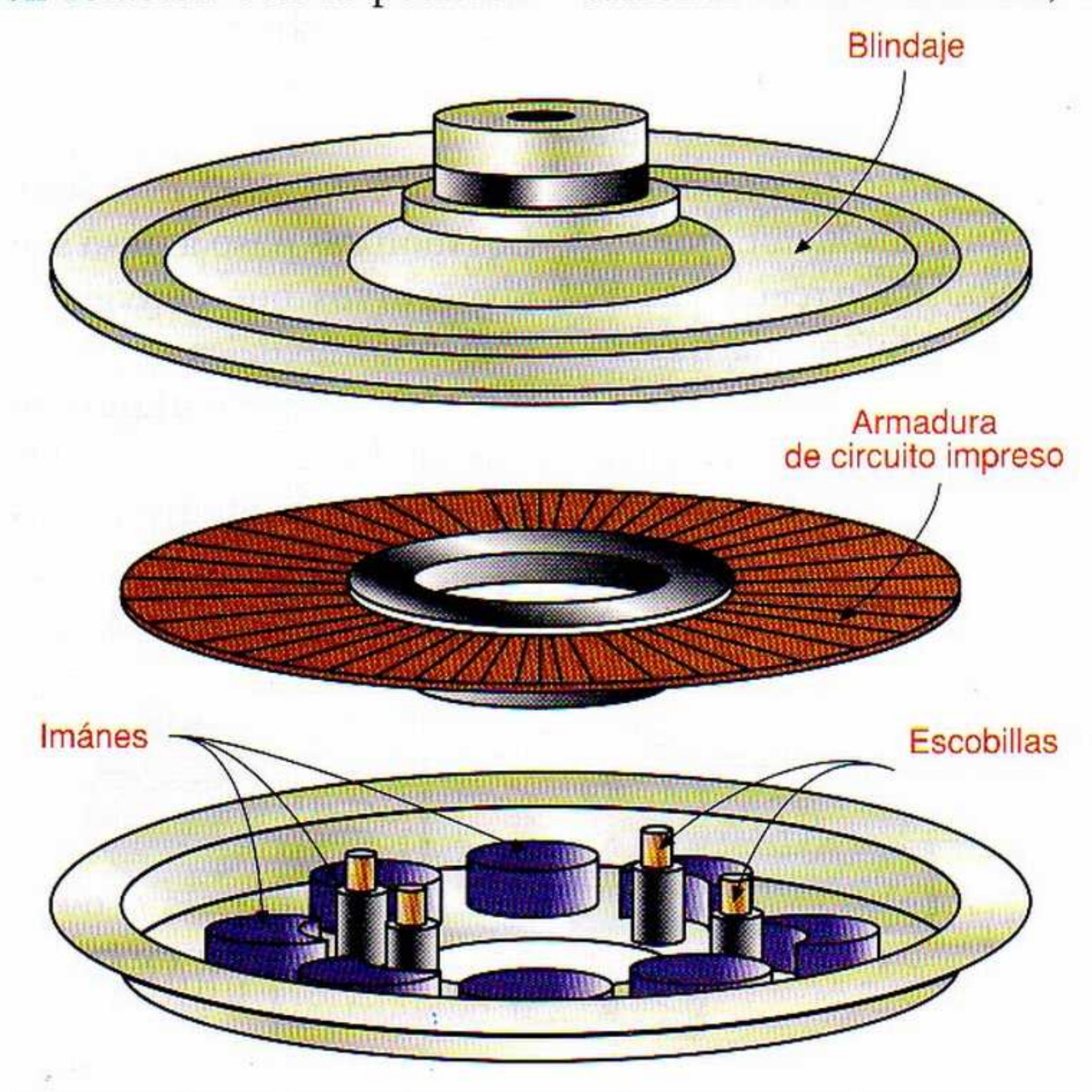


Figura 15.4 Estructura típica de un servomotor DC de bobina móvil o de circuito impreso.

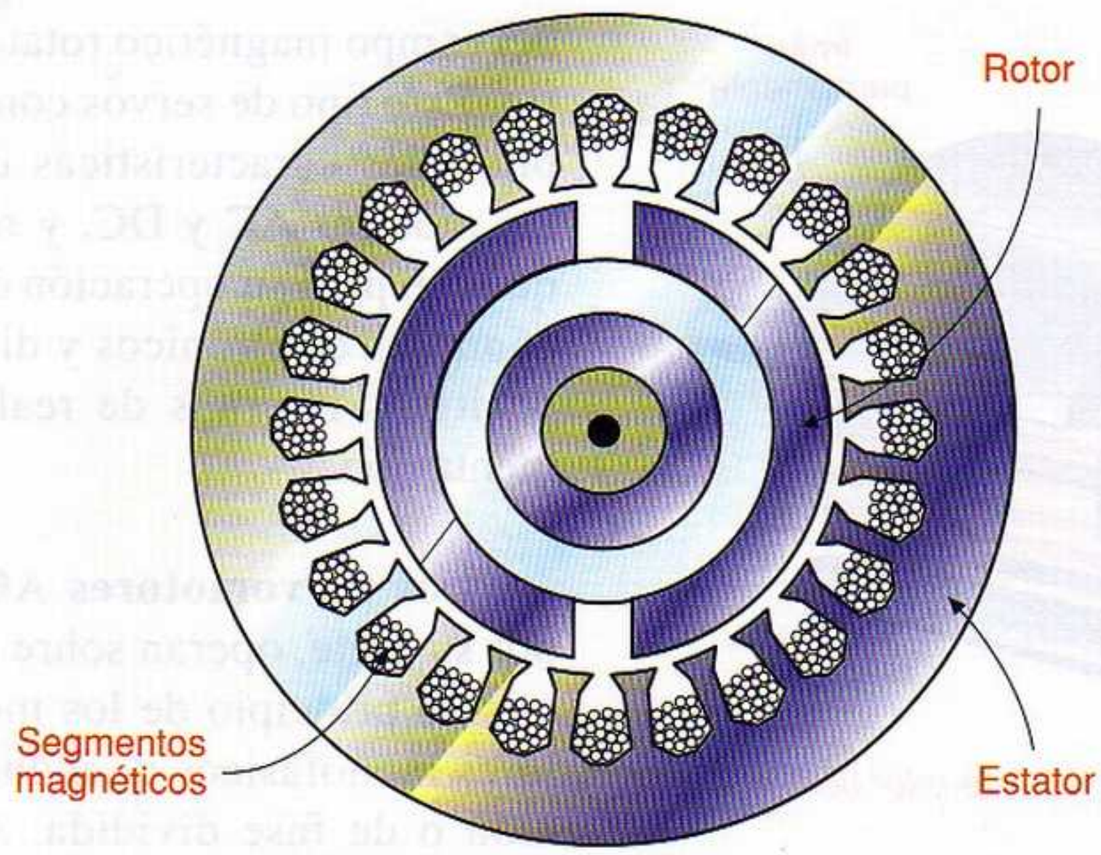


Figura 15.5 Servomotor DC sin escobillas

servomotor AC utiliza un circuito electrónico (*drive*) para ejecutar esta función, como se ilustra en la **figura 15.6**.

En este caso, la fuente AC principal (Vs) alimenta el devanado principal y el *drive* del servomotor. Este último recibe dos señales de entrada: una de realimentación, proveniente de un transductor, que indica la posición real, y una de comando o referencia, que indica la posición deseada. El *drive* compara ambas señales y produce internamente una señal de error que se utiliza para controlar el valor rms del voltaje aplicado al devanado auxiliar (Va). Este tipo de servos se utilizan con potencias desde 1/1500 hp hasta 1/8 hp. Más allá de este rango, son más eficientes los servos DC.

Motores paso a paso

Los **motores paso a paso** son dispositivos que convierten comandos digitales en movimientos incrementales de exactitud conocida. En otras palabras, al contrario de los motores AC y DC convencionales, que operan a partir de voltajes de entrada aplicados continuamente y producen usualmente un movimiento rotatorio continuo, los motores paso a paso se mueven en pasos discretos. Puesto que la marcha a pasos (*stepping*) ocurre en estricta concordancia con los comandos digitales de entrada proporcionados, la posición final del eje es siempre predecible.

Los motores de paso pueden ser de reluctancia variable, de imán permanente o híbridos, cada uno con sus propias características constructivas y funcionales. Los **motores paso a paso de reluctancia variable** son los más económicos. Se caracterizan por poseer un estator devanado y un rotor de hierro dulce de múltiples polos. El ángulo de paso, determinado por el número de dientes de estator y el rotor, varía típicamente desde 5° hasta 15°. Este tipo de motores tienen un bajo torque y una baja inercia de carga.

Los **motores paso a paso de imán permanente** tienen ángulos de paso entre 5° y 90°. Son más costosos que los de reluctancia variable y operan típicamente a ratas entre 100 pps (pasos/segundo) y 350 pps. Los mismos emplean usualmente un estator devanado con un rotor de imán permanente y proporcionan un

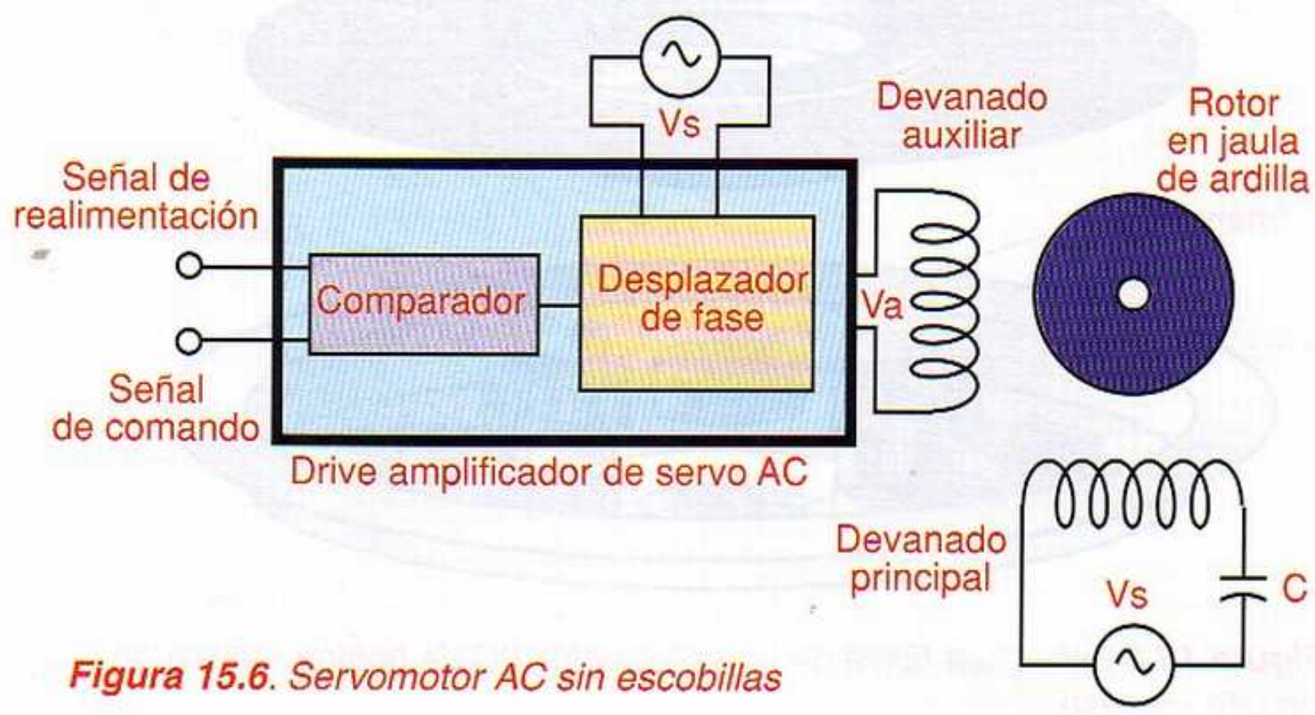


Figura 15.6. Servomotor AC sin escobillas

bajo torque. La precisión del paso es mayor de ±10º. Algunos utilizan un rotor de disco plano, localizado entre dos núcleos electromagnéticos en forma de C, para disminuir su inercia y permitir la operación en altas velocidades.

Los **motores paso a paso híbridos** combinan en una sola unidad las características de los motores de imán permanente y de reluctancia variable. En los mismos, el estator es devanado y tanto este último como el rotor son dentados. En la **figura 15.**7 se muestra la sección transversal de un motor de este tipo. El rotor está compuesto de uno o más elementos llamados **pilas** o *stacks*, cada una provista de laminaciones cóncavas y convexas, unidas entre sí, que constituyen una estructura en forma de copa. En el espacio vacío entre cada par de copas, se inserta un imán permanente. Las pilas del rotor están aseguradas a un eje de acero inoxidable.

Este tipo de motores tienen capacidades de torque entre 50 y 2000 oz-in (onzas por pulgada) o más, ángulos de paso desde 0.5° hasta 15°, precisiones de paso del orden de ±3% y pueden operar con velocidades superiores a los 1000 pps. La mayoría son de cuatro fases, es decir utilizan cuatro juegos de devanados que forman cuatro polos. Además, puesto que el ángulo de paso está definido por la geometría de los dientes, la posición del eje es siempre conocida y pueden ser operados confiablemente en lazo abierto. Sin embargo, tienden a oscilar al detenerse y su capacidad de manejar cargas inerciales muy altas es limitada.

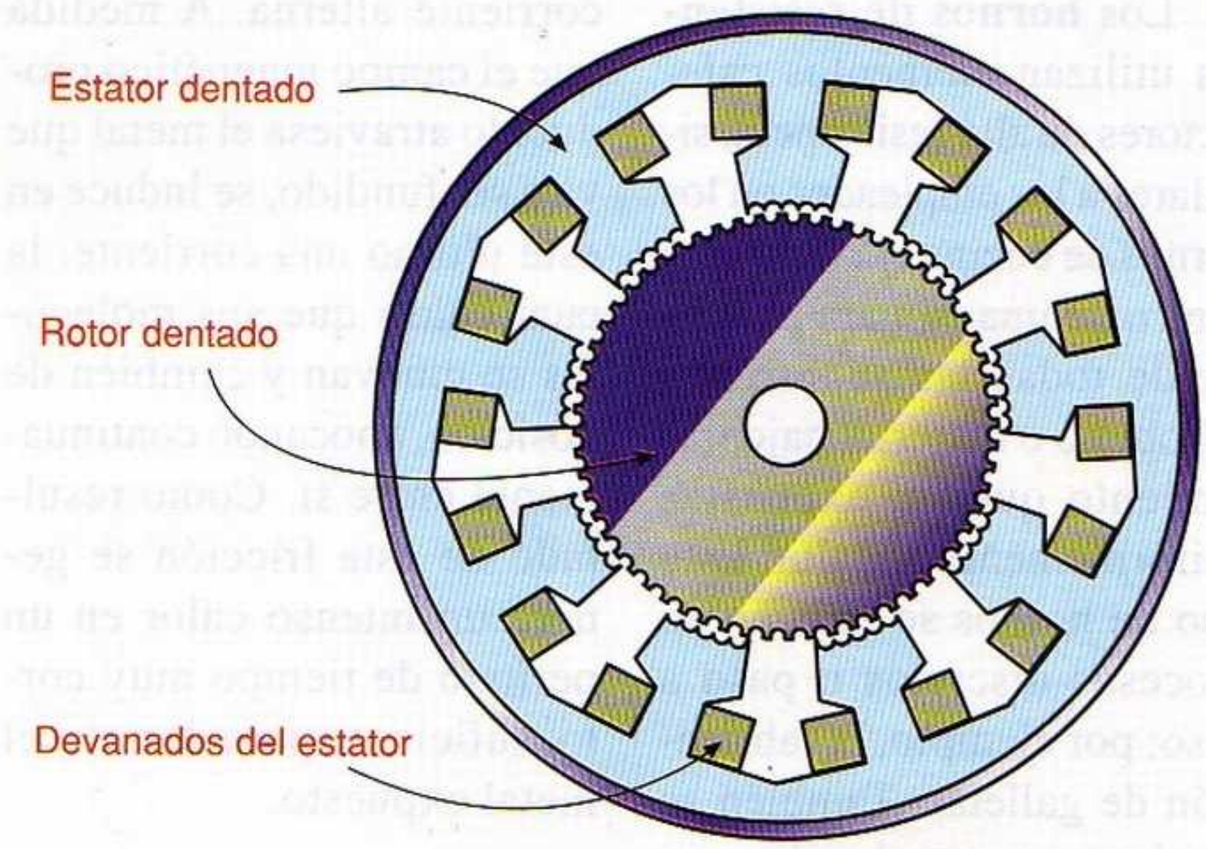


Figura 15.7. Sección transversal de un motor paso a paso híbrido

Hornos eléctricos

Una de las fuentes de calor más comunes de muchos procesos industriales son los **hornos**. Estos últimos, construídos de ladrillo y otros materiales refractarios, confinan el calor generado dentro de cámaras. Se utilizan para tratar térmicamente ciertos materiales, por ejemplo cocinar alimentos o endurecer y fundir metales. Pueden ser de **combustión** o **eléctricos**, dependiendo de si utilizan combustibles fósiles o electricidad para producir calor. Los hornos eléctricos, a su vez, pueden ser de arco, resistencia o inducción. En la **figura 15.8** se muestra la estructura básica de un **horno de arco**.

En este caso, la fuente de alimentación de alto voltaje se conecta por un terminal a un electrodo y por el otro, a un crisol hecho de un material conductor, generalmente grafito. Inicialmente, el electrodo está en contacto con el metal que va a ser fundido. Al comenzar a fluir la corriente, se forma un arco, cuyo calor funde el metal y lo pasa al estado líquido. Este tipo de hornos se emplean principalmente para derretir acero en la industria de la fundición.

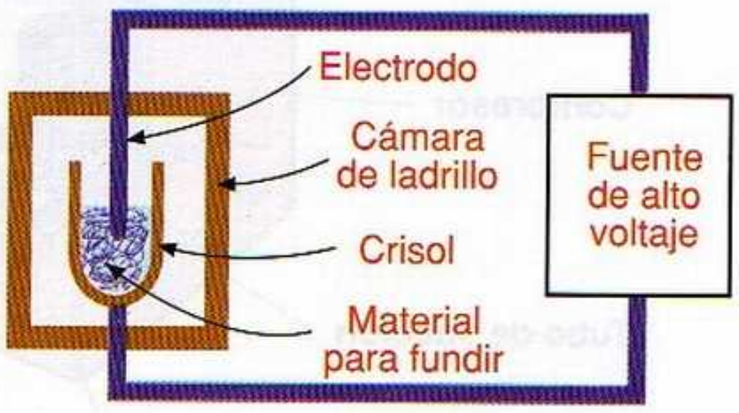


Figura 15.8. Estructura de un horno de arco

Los **hornos de resistencia** utilizan elementos calefactores de alta resistencia, similares a los empleados en los hornos de cocina, y colocados dentro de una cámara aislada donde todas las superficies del objeto o material bajo tratamiento quedan expuestas uniformemente al calor. Este tipo de hornos se utilizan en procesos discretos o paso a paso; por ejemplo, la fabricación de galletas. También se emplean para probar la confiabilidad de los encapsualdos en la industria de los semiconductores.

En el caso de los **hornos de inducción**, alrededor de la cámara se devanan bobinas de alambre alimentadas con corriente alterna. A medida que el campo magnético producido atraviesa el metal que va a ser fundido, se induce en este último una corriente, la cual causa que sus moleculas se muevan y cambien de posición, chocando continuamente entre sí. Como resultado de esta fricción se genera un intenso calor en un período de tiempo muy corto, suficiente para derretir el metal expuesto.

Sistemas de enfriamiento

Los **sistemas de enfriamiento** se utilizan principalmente en las industrias procesadores de alimentos para conservar productos perecederos a bajas temperaturas. También son muy empleados en las plantas químicas para enfriar líquidos hasta los niveles requeridos antes de ser mezclados. Los mismos operan sobre principios idénticos a los de los refrigeradores domésticos, es decir, el control mecánico de reacciones de evaporación y condensación. En la **figura 15.9** se muestran los elementos de un sistema de refrigeración moderno.

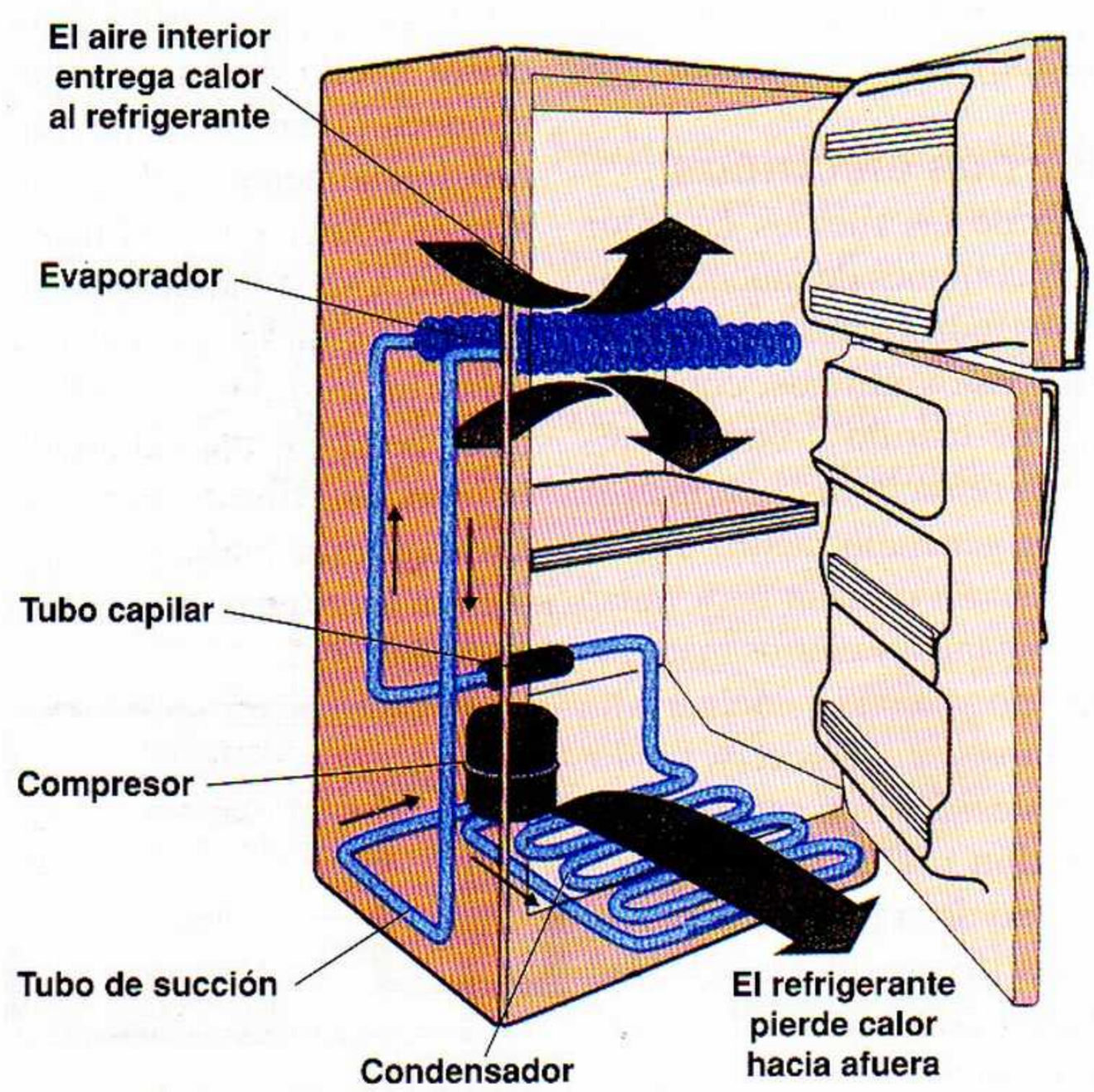


Figura 15.9. Estructura de un sistema de refrigeración

En este caso, se dispone de un compresor que bombea freón, un fluido refrigerante, a través de todo el sistema. El freón ingresa líquido a un tubo capilar y luego es convertido en un gas frío por un evaporador. A medida que este gas frío fluye por las serpentinas del evaporador, absorbe calor de los compartimientos del refrigerador y se va calentando. Este gas cálido es succionado por el compresor y convertido nuevamente al estado líquido por un condensador previo al tubo capilar. El proceso se repite.

El control del compresor lo realiza un termostato, el cual se encarga de mantener la temperatura del sistema dentro de un rango deseado. La transferencia de calor hacia el medio ambiente es asistida por ventiladores. Para más información, se remite al lector al **Curso Práctico de Electricidad** de **CEKIT**. Ω

Capítulo 16

Controladores PID

Los controladores PID son uno de los dispositivos más utilizados en todo el mundo para controlar procesos o sistemas. Estos equipos electrónicos son cada vez más avanzados tecnológicamente, pero todos ellos conservan los mismos principios teóricos. En este capítulo examinaremos estos últimos

Generalidades

Todos los sistemas o procesos que se encuentran en la industria deben seguir un comportamiento adecuado en sus variables, para que así cumplan los objetivos para los cuales fueron diseñados, y se puedan obtener los productos o servicios deseados con un nivel de calidad satisfactorio. Para hacer esto posible, los sistemas automáticos de control utilizan unos dispositivos electrónicos denominados *controladores PID*, **figura 16.1**, cuya función es garantizar que los mismos no se salgan de sus parámetros, ideales o esperados, de comportamiento.

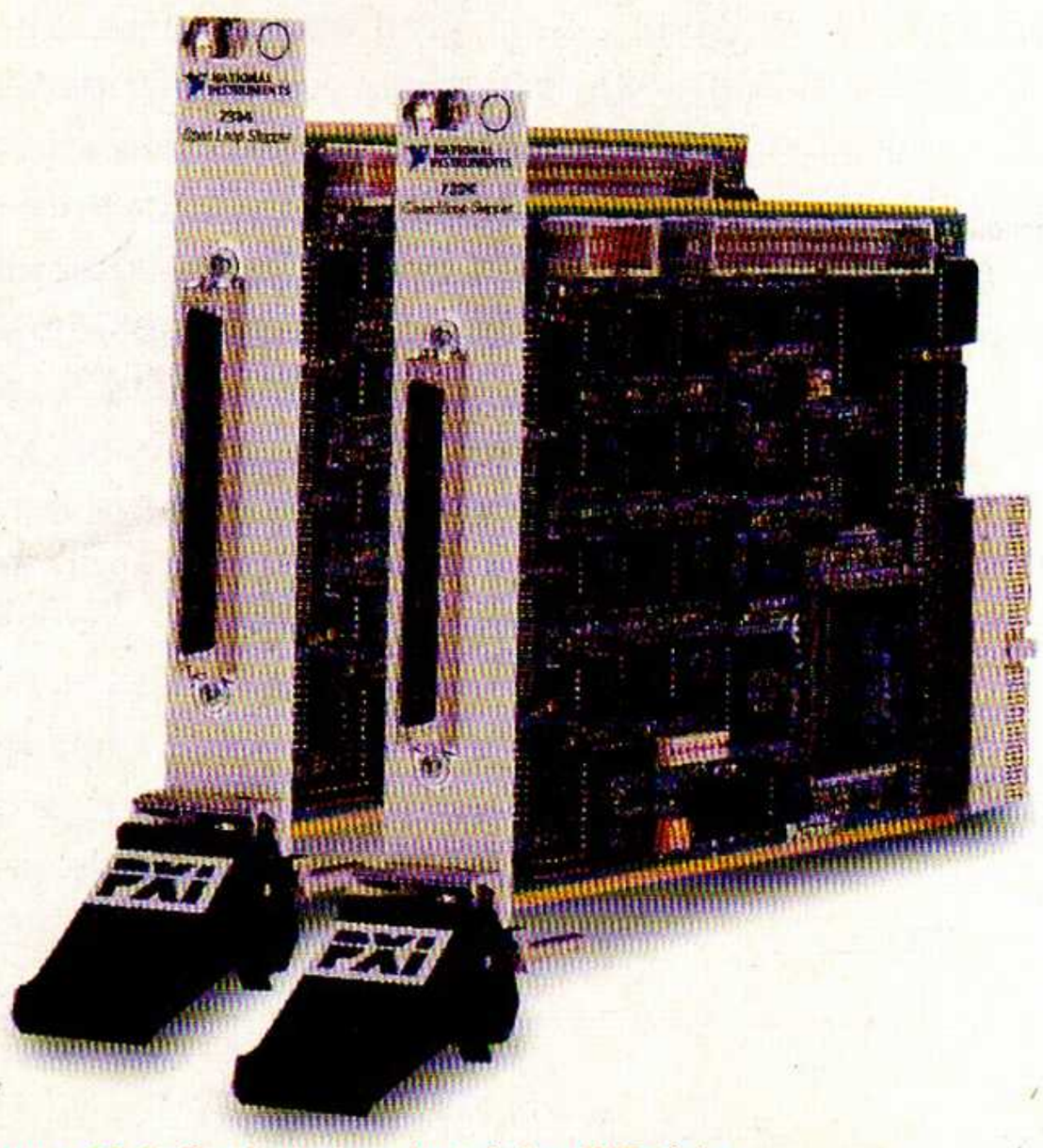


Figura 16.1. Controlador electrónico PID típico.

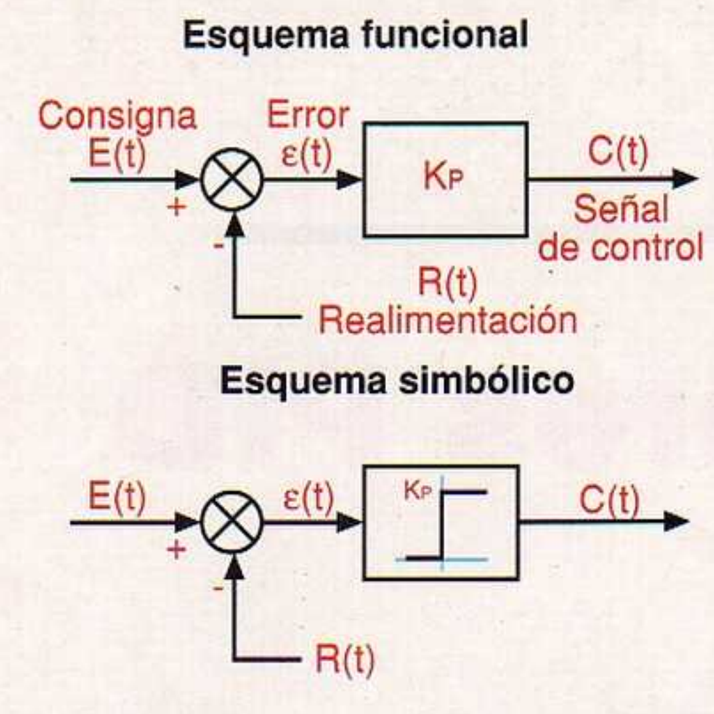


Figura 16.2. Bloque de control proporcional

Un controlador PID es un dispositivo "inteligente", en el sentido de que se encarga de controlar las entradas y leer las salidas para verificar que todo se encuentre dentro del comportamiento normal. Estos dispositivos llevan a cabo una acción de corrección PID (Proporcional+Integral+Derivativa), mediante la implementación de algoritmos matemáticos que ejecutan dichas acciones. El resultado obtenido es la señal que se introducirá al sistema para minimizar los errores y obtener una respuesta lo más rápida posible ante perturbaciones externas.

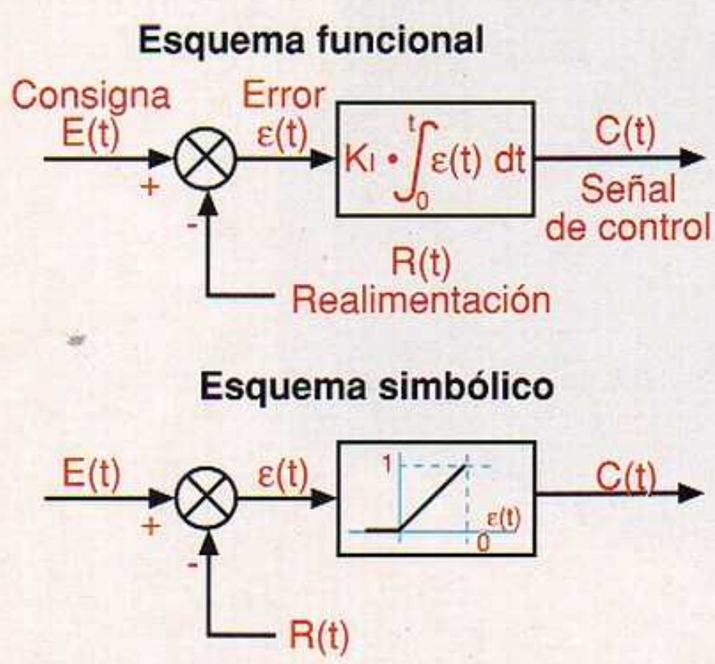


Figura 16.3. Bloque de control integral

Acciones de control básicas

Un controlador PID posee unos parámetros internos que deben configurarse con ciertos valores, dependiendo del tipo de planta que se esté controlando; dicho procedimiento de configuración se denomina *sintonización*. Para comprender mejor el funcionamiento de un controlador PID y distinguir la importancia de cada acción de control (proporcional, integral y derivativa), podemos remitirnos a un modelo matemático denominado *función de transferencia*.

Básicamente, se trata de una ecuación que describe con gran exactitud la salida generada por el dispositivo teniendo en cuenta las entradas que ha recibido y en la cual se visualiza la combinación de los tres tipos de acciones de control. Por lo general el sistema se configura de modo que existan estos tres tipos y así conseguir una acción combinada.

Acción proporcional

Se caracteriza porque la señal de control depende proporcionalmente de la señal de error. La magnitud de esa proporción se denomina *constante proporcional*. El esquema de este tipo de control se aprecia en la **figura 16.2** y su comportamiento se puede expresar así:

$$C(t) = Kp\ e(t).$$

Acción integral

Un controlador que solo presente acción proporcional siempre deja un error por corregir. La acción integral permite anular este error, haciendo que la señal de control C(t), crezca proporcionalmente al producto «error x tiempo». La estructura de bloques de un controlador de acción integral se aprecia en la **figura 16.3** y su comportamiento puede expresarse con una de las siguiente ecuaciones:

$$d[C(t)] = K1\ \varepsilon(t)\ dt$$

$$Ct = K1 \int_0^t \varepsilon(t)\ dt$$

Donde Ki es la constante de acción integral.

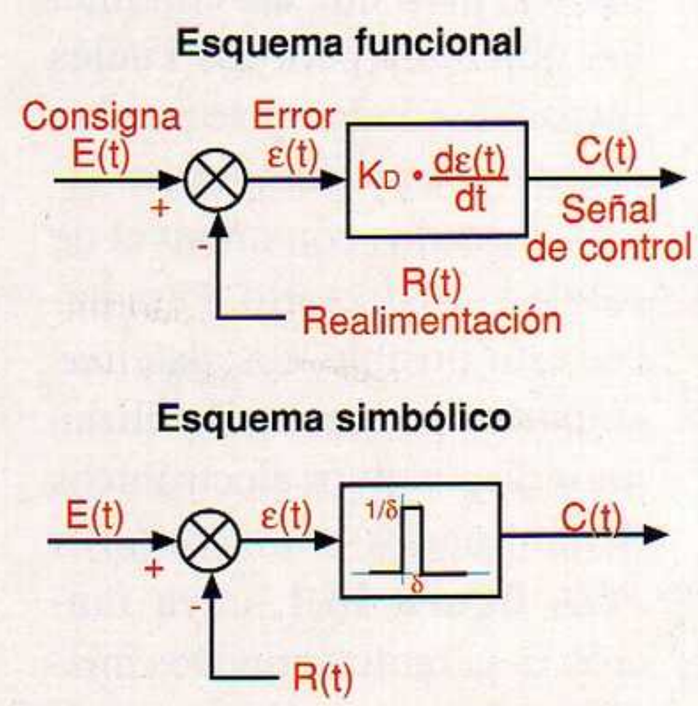


Figura 16.4. Bloque de control derivativo

Acción derivativa

Las acciones de control proporcional e integral no permiten resolver completamente todos los problemas de control. La primera deja un error permanente y la segunda podría causar inestabilidad o exceso de tiempo de respuesta. La acción de control derivativa complementa la labor efectuada por las dos anteriores, ayudando a obtener una respuesta dinámica más rápida (menor tiempo de respuesta). En la **figura 16.4** se puede ver el diagrama de un controlador derivativo. Su ecuación de transferencia es:

$$Ct = Kd \frac{d\varepsilon(t)}{dt} = Td \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$$

Donde Kd es la constante de acción derivativa, la cual es un parámetro de configuración del tiempo de respuesta.

Controladores PID

Los controladores industriales por lo general combinan los tres tipos de métodos de control, dando lugar a los controladores PID. El comportamiento de un controlador PID se puede entender como la superposición de estas tres acciones.

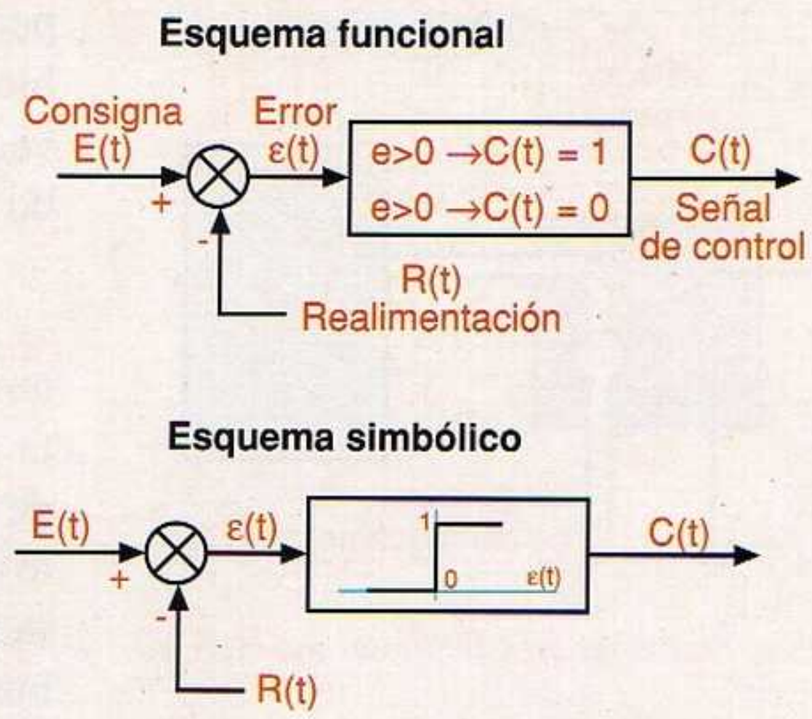


Figura 16.5. Bloque de control todo o nada

La implementación de controladores industriales se hace a través de autómatas o dispositivos controladores específicos, en donde el usuario solo debe establecer los valores para Kp, Ki y Kd. Aunque aparentemente el procedimiento es sencillo, la elección de dichos parámetros (*sintonización*) no siempre es tan simple, pues pueden aparecer problemas de inestabilidad o falta de rapidez, según el proceso. Ante esa dificultad, muchos controladores vienen con capacidades de "autoajustar" dichos parámetros mediante aprendizaje.

Algunos controladores digitales incorporan fórmulas correctivas para evitar un comportamiento demasiado brusco o incluso permiten cambiar los valores de Kp, Ki y Kd, dependiendo de los valores de la planta, dando lugar a un *control adaptivo*.

En realidad para la gran mayoría de aplicaciones industriales, un dispositivo PI es suficiente para cumplir con los requerimientos de control del sistema. Sin embargo, algunos procesos pueden presentar problemas de control muy complicados que requieren de las tres acciones de control, sobre todo en situaciones donde se presenten cambios de carga muy rápidos y en casos donde haya mucho atraso en la aparición de la señal correctiva sobre el sistema.

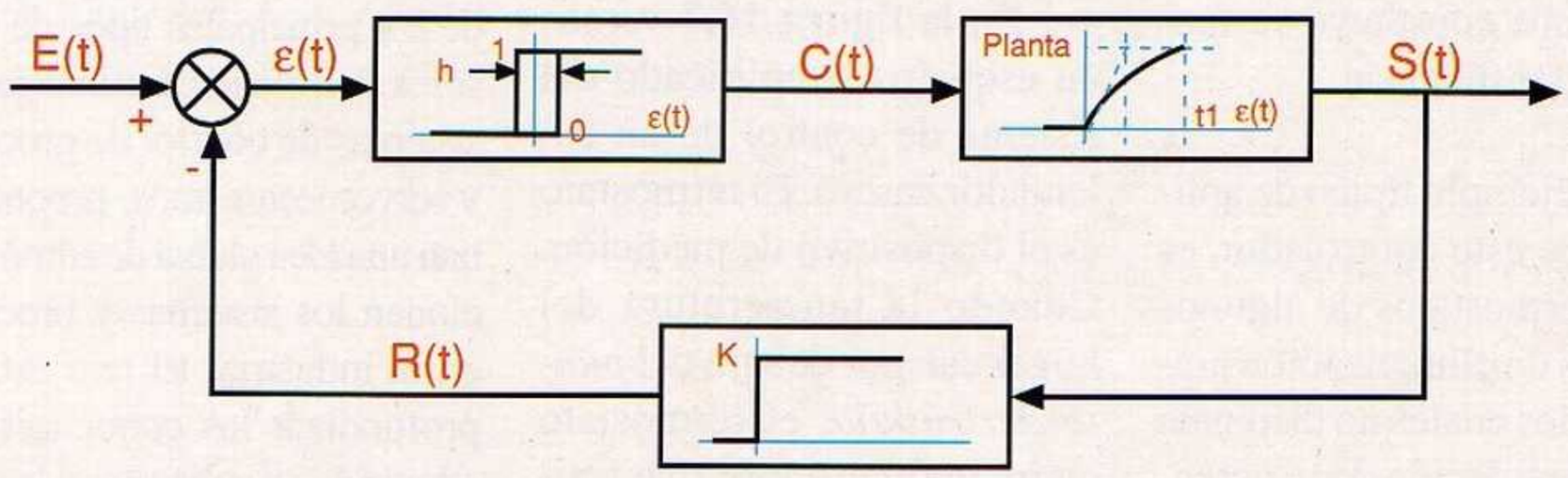


Figura 16.6. Controlador todo o nada con histéresis

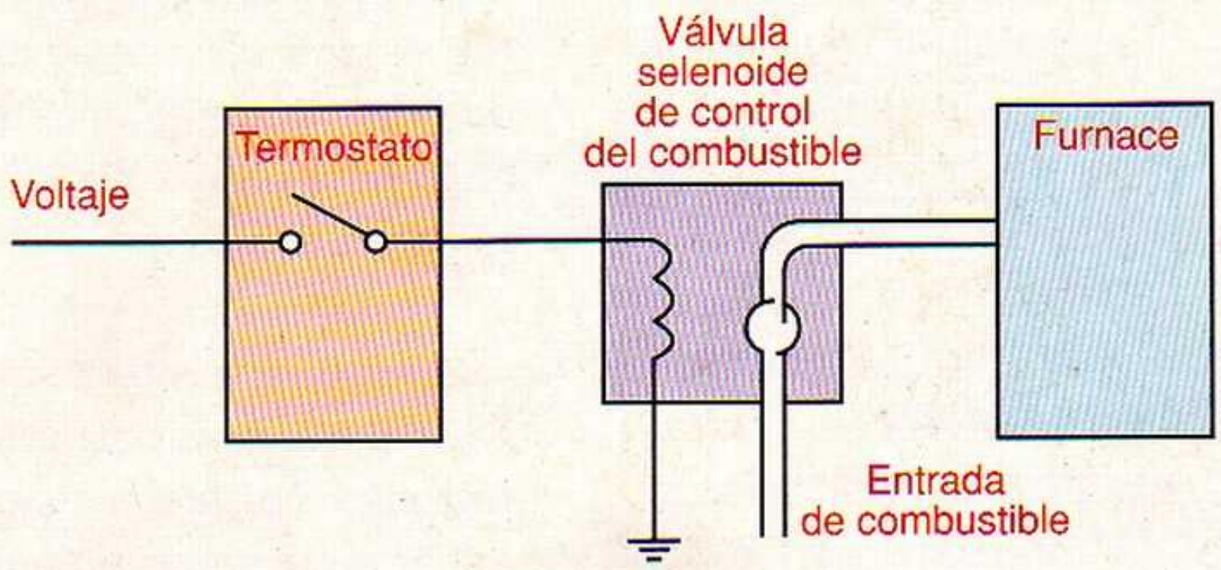


Figura 16.7 Sistema de control todo o nada de un calentador casero

Controladores todo o nada

Un controlador ***on-off*** o ***todo o nada*** es aquel en donde la salida solo puede tener dos posibles valores: uno máximo y uno mínimo. En estos dispositivos, las entradas tienen magnitudes continuas y las salidas son de tipo lógico (1 o 0).

El diagrama de bloques de este tipo de controlador se aprecia en la **figura 16.5**. Allí vemos que el dispositivo toma una señal de referencia y la compara con una señal de realimentación (hasta aquí no hay ninguna diferencia con los demás controladores). La característica más llamativa es que sus salidas sólo pueden tomar los valores uno o cero, dependiendo del umbral que constituye su función de transferencia.

Un ejemplo típico de aplicación de este controlador, es en los termostatos de algunos sistemas de climatización ambiental, los cuales no disponen de una regulación de la potencia calorífica, sino simplemente de un interruptor que conecta o desconecta toda la potencia disponible.

En la práctica, este tipo de sistemas tienden a presentar un fenómeno denominado *histéresis* o *banda muerta* consistente en una zona en la cual el controlador no actúa. Por esta razón, las ecuaciones que describen este sistema son las siguientes:

$$C(T) = 1 \quad si \quad E(t) > R(t) + h/2$$

$$C(T) = 0 \quad si \quad E(t) < R(t) - h/2$$

donde *h* es la *banda muerta* por debajo de la cual el sistema no responde. El esquema del control para este caso se aprecia en la **figura 16.6**.

En la **figura 16.7** vemos un esquema simplificado del sistema de control de un calentador casero. El termostato es el dispositivo de medición. Cuando la temperatura del hogar cae por debajo del *punto de trabajo*, el termostato cierra un interruptor que activa una válvula. Esta última permite el paso de combustible y la correspondiente activación de un horno, encargado de calentar la casa.

Este crecimiento en la temperatura se mantiene hasta que se sobrepasa el punto de trabajo, donde el termostato desactiva el interruptor; se interrumpe el paso del combustible y el horno deja de funcionar, permitiendo que el sistema se enfríe. Con esta técnica se origina una señal de control cíclica debido a que el controlador no podrá seguir fielmente al punto de trabajo, sino que estará oscilando permanentemente alrededor de él.

Con este capítulo finalizamos la sección de **Control** del Curso Práctico de Electrónica Industrial de CEKIT. Esperamos haber proporcionado un buen marco de referencia, con un enfoque más práctico que teórico, para todos aquellos que se inician o ya están inmersos en esta maravillosa rama de la ingeniería.

Los conceptos sobre sistemas de control y la descripción de los principales tipos de sensores y actuadores utilizados en sistemas de control de procesos y servomecanismos, proporcionan una idea global de cómo funcionan los sistemas y procesos en la industria. El reto está en profundizar los conocimientos adquiridos y aplicarlos a la solución de problemas reales. Ω